

Aplicação da metodologia Seis Sigma para estudo do ensaio de estanquidade

João António Ribeiro da Graça Castanheira Pinto

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Engenheiro Paulo Luís Cardoso Osswald

Orientador na empresa: Engenheiro Hugo Renato Ferreira da Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2016-07-04

À minha mãe

Resumo

O presente projeto surgiu da necessidade da empresa aprofundar o seu conhecimento quanto à variabilidade associada ao ensaio de estanquidade, presente na maioria das linhas de produção da empresa e que verifica uma especificação chave do cliente. No ramo automóvel, a competitividade e o ritmo de produção têm vindo a crescer e, como tal, é necessário assegurar que o ensaio de estanquidade esteja perto da sua otimização para que o retrabalho associado à deteção de uma não-conformidade quando na verdade não é seja baixo e para que a medição seja fiável de modo a evitar reclamações provenientes do cliente. Uma possível falha neste ensaio de estanquidade poderá não só suscitar problemas ao nível do cliente, como ter um impacto negativo no consumidor final em termos de desempenho do produto adquirido. Um aumento de fiabilidade deste processo terá efeitos positivos não só na perspetiva do cliente, como também na perspetiva da empresa no que diz respeito aos custos relacionados com o processo e aos indicadores para a melhoria deste.

Este estudo teve como base a aplicação da metodologia Seis Sigma, uma vez que esta tem como objetivo atingir a ausência de erros no desempenho do processo, melhorando a sua eficácia e eficiência, alinhando-o com os requisitos do cliente. Como o processo em análise já existe, aplicou-se o modelo DMAIC, pela sequência das fases “Define”, “Measure”, “Analyze”, “Improve” e “Control”.

Na primeira fase, foi constituída a equipa de suporte ao projeto e realizado um estudo acerca do ensaio e do problema em questão. Na segunda fase, foi feito um levantamento dos dados da produção da referência a estudar, com especial foco nos indicadores retrabalho e sucata. Também se realizou a validação do sistema de medição, sendo esta de extrema importância para averiguar se a medição atual é fiável ou se é uma fonte de variabilidade. Na terceira fase, juntamente com a equipa, foram identificados os potenciais fatores que pudessem contribuir para a variabilidade do ensaio. Após esse registo, foram analisados grande parte desses fatores, usando ferramentas estatísticas como o teste de hipóteses e o desenho de experiências. Os dados sujeitos a análise resultam de séries de experiências realizadas quer no laboratório de metrologia quer na própria linha de produção. Na quarta fase, com base nos resultados obtidos na fase anterior, foram implementadas melhorias não só na linha de produção em questão como também noutros setores da fábrica. Após as melhorias implementadas, foi novamente realizada uma análise dos dados da produção da referência em causa de modo a medir o impacto do trabalho desenvolvido. Na última fase, foram criadas ações para que essas melhorias se mantivessem depois do final do projeto.

A aplicação das fases da metodologia permitiu atingir os objetivos propostos no início da dissertação. O indicador referente à repetição do ensaio devido a resultados não-conformes e inconclusivos sofreu um decréscimo relativamente ao início do projeto. Os resultados do trabalho desenvolvido ao longo da dissertação suscitaram o interesse da empresa na transversalização do estudo realizado a outros produtos produzidos na fábrica, através da aplicação dos resultados obtidos noutros ensaios de estanquidade.

Implementation of Six Sigma methodology to study the leakage test

Abstract

The basis of the present project was the company's intent to increase the knowledge about the variability associated to the leakage test. Nowadays, the leakage test is present in most of the company's production lines and is used to verify a customer's key specification. In the automotive industry, the growth of competitiveness and pace of production make it necessary to ensure that the leakage test is near optimization. This optimization will allow low rework associated to the detection of non-compliance when in fact it is not and reliable measurement, which will avoid complaints from the customer. One failure in that test can have a negative impact on the final consumer in terms of the product performance. An increase of process reliability will have positive effects not only on the customer's perspective, as well as on the company's perspective.

This study was based on the application of Six Sigma methodology, since this approach aims to achieve the absence of process defects, improving its effectiveness and efficiency by aligning it with the customer's requirements. As the process already exists, the DMAIC model was applied, following the sequence of phases "Define", "Measure", "Analyze", "Improve" and "Control".

In the first phase, the team to support the project development was set up. A study about the process and the related problem was also conducted. In the second phase, a data collection of the reference's production was made, with a special focus on rework and scrap. A measurement system analysis was carried out, as it is extremely important to find out whether the current measurement is reliable or if it is a source of variability. In the third phase, all factors identified by the team, as potentially contributing to the process's variability, were collected into one cause and effect diagram. The majority of factors were analyzed with statistical tools such as a hypothesis test and design of experiences. The analyzed data were obtained from series of experiences performed either in the metrology laboratory or in the production line. In the fourth phase, based on the results obtained in the previous phase, improvements have been implemented not only in the production line but also in other plant sections. After the improvement implementation, a data collection of the reference's production was made again in order to analyze the impact of the changes. In the last phase, control actions were created to maintain the improvements after the project conclusion.

The application of the methodology phases allowed to achieve the objectives proposed at the beginning of the project. As a result of the improvements in the leakage test, the rework rate related to the repetition of the test due to non-compliance and inconclusive results has decreased. The results achieved during the dissertation have raised the company's interest in studying the leakage test in other production lines.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à “BorgWarner Viana do Castelo” pela oportunidade de realizar a dissertação nas suas instalações.

Ao Eng.º Hugo Silva, pelo apoio dado ao longo do desenvolvimento do projeto, pelo conhecimento transmitido e pelo interesse demonstrado no sucesso do trabalho desenvolvido.

A todos os colaboradores da “BorgWarner Viana do Castelo” envolvidos no projeto, pela disponibilidade e colaboração demonstrada e pelo conhecimento transmitido.

Ao professor Paulo Osswald, pela disponibilidade demonstrada ao longo da dissertação, assim como pelo acompanhamento prestado para que o projeto tomasse o rumo certo.

Por fim, um agradecimento especial à minha mãe, pelo contínuo apoio ao longo da dissertação e dos 5 anos de faculdade.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	O Projeto na Empresa “BorgWarner Viana do Castelo”	1
1.3	Objetivos do projeto	3
1.4	Método seguido no projeto	4
1.5	Estrutura da dissertação	4
2	Enquadramento teórico	5
2.1	Definição do Seis Sigma	5
2.2	Níveis Sigma	6
2.3	Modelos do Seis Sigma	8
2.4	Efeito do Seis Sigma na inovação e no desempenho da instituição	10
2.5	Lean Seis Sigma	11
2.6	Validação do Sistema de Medição	12
2.7	Teste de Hipóteses	14
2.8	Desenho de experiências (DOE)	15
3	Descrição e análise da situação atual e apresentação do problema	19
3.1	Peça ensaiada	19
3.2	Ensaio de estanquidade	22
3.3	1ª Fase do Modelo DMAIC: Definir	25
4	Apresentação com algum detalhe da solução proposta	28
4.1	Testes realizados às parametrizações do ensaio	28
4.2	2º Fase do Modelo DMAIC: Medir	30
4.3	3ª Fase do Modelo DMAIC: Analisar	33
4.4	4ª Fase do Modelo: Melhorar	44
4.5	5ª Fase do modelo DMAIC: Controlar	51
4.6	Criação de “guidelines” para novos projetos	52
5	Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro	53
	Referências	55
	ANEXO A: Planeamento do projeto	56
	ANEXO B: Tabela de correspondência entre rendimento, nível sigma a curto e longo termo e defeito por milhão de oportunidades	57
	ANEXO C: Desenho técnico da peça testada	58
	ANEXO D: Fluxograma do Processo produtivo da peça estudada	59
	ANEXO E: Fotografias relativas aos elementos constituintes do ensaio de estanquidade e às ferramentas usadas nesse ensaio	60
	ANEXO F: Instrução de controlo usada no ensaio de estanquidade (até à data de início do projeto) 61	
	Anexo G: Gama de Operação	62
	Anexo H: Project Charter	63
	ANEXO I: Figuras resultantes da validação da Ferramenta com peça de referência	64
	ANEXO J: Figuras resultantes da Ferramenta sem peça de referência	65
	ANEXO K: Figuras resultantes da validação da Ferramenta sem peça de referência na linha de produção	66
	ANEXO L: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado à média das medições realizadas com ou sem peça de referência	67
	ANEXO M: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado ao desvio padrão das medições realizadas com ou sem peça de referência	68

ANEXO N: Fotografias do Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo	69
ANEXO O: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo 70	
ANEXO P: Fotografias do Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material	81
ANEXO Q: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material.....	82
ANEXO R: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria método	92
ANEXO S: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado à média das medições realizadas com peça de referência fora ou dentro da câmara de ensaio.....	102
Anexo T: Figuras resultantes da regressão realizada entre a temperatura ambiente e a percentagem de retrabalho em cada turno	103
ANEXO U: Dados de apoio ao subcapítulo 4.3.9.....	104
ANEXO V: Fotografias relativas à porta do armazém e das ventoinhas na linha de produção 105	
ANEXO W: Definição dos limites da temperatura ambiente a usar no “shop floor”	106
ANEXO X: Etiqueta criada para controlo de tempo de arrefecimento das peças	108
ANEXO Y: Influência das parametrizações das fases do ensaio no valor médio e na variabilidade das medições	109
ANEXO Z: Placard relativo à inspeção da porta automática	111

Siglas

AHP - Analytic Hierarchy Process

ANOVA – Analysis of Variance

CTC – Critical to Cost

CTD – Critical to Delivery

CTQ – Critical to Quality

DMADV – Define Measure Analyze Design Verify

DMAIC – Define Measure Analyze Improve Control

DOE – Design Of Experiments

DPMO – Defects per Million Opportunities

EGR – Exhaust Gas Recirculation

FIFO – First In First Out

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSE – Limite Superior de Especificação

MQE – Manufacturing Quality Engineer

MRP – Manufacturing Resource Planning

MSA – Measurement Systems Analysis

PPM- Parts per Million

QFD - Quality Function Deployment

ROI- Return on Investment

R&R- Repeatability and Reproducibility

SIPOC – Supplier Input Process Output Customer

SPC – Statistical Process Control

VOC – Voice of the Customer

Índice de Figuras

Figura 1 – Logótipo da BorgWarner	2
Figura 2 - Panorama das vendas em 2015	2
Figura 3 - Instalações da “BorgWarner Viana do Castelo”	2
Figura 4 - Fases do modelo DMAIC (Ginn e Varner 2004)	4
Figura 5 – Representação de um processo centrado e normalmente distribuído (Abreu 2011)	7
Figura 6 – Representação da variação da média de um processo estável e seus efeitos nos defeitos e % de conformidade (Abreu 2011)	7
Figura 7 - Visão geral dos modelos DMAIC e DMADV (adaptado de Pyzdek 2003)	10
Figura 8 - Vantagem competitiva do Lean Seis Sigma (adaptado de Arnheiter e Maleyeff 2005)	11
Figura 9 – Fontes de variabilidade de variabilidade no MSA (adaptado de Six Sigma Academy 2002)	13
Figura 10 - Critérios de aceitação do teste "Gauge R&R" (adaptado de Six Sigma Academy 2002) ..	14
Figura 11 – Resolução do DOE tendo em conta o número de experiências e fatores	17
Figura 12 – Causas do retrabalho no mês de fevereiro	21
Figura 13 – Causas da sucata no mês de fevereiro	21
Figura 14 - Princípio de funcionamento do ensaio	24
Figura 15 - Peças usadas para verificação do Fugómetro	24
Figura 16 - Árvore "Critical to" do ponto de vista da fábrica	26
Figura 17 - Visão geral do âmbito do projeto no contexto processual da empresa	27
Figura 18 - Layout das instalações da empresa	28
Figura 19 - Parametrização do tempo de enchimento	29
Figura 20 – Efeito do tempo de estabilização na variação de pressão	29
Figura 21 – Efeito do tempo de equalização na variação de pressão	30
Figura 22 - Diagrama causa efeito	34
Figura 23 - Relação entre temperatura ambiente, temperatura da peça e valor de fuga	38
Figura 24 - Curva de arrefecimento da peça	40
Figura 25- Efeito de medições consecutivas na temperatura da peça de referência dentro e fora da câmara	40
Figura 26 - Causas do retrabalho no período de implementação de melhorias	49
Figura 27 – Análise de capacidade do processo antes/depois das melhorias	50
Figura 28 – Plano de controlo	52

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dados da produção relativos a fevereiro	20
Tabela 2 - Valor de Fuga correspondente a duas experiências	26
Tabela 3 – Registo do número de peças retrabalhadas em cada Fugómetro.....	41
Tabela 4 – Etapas constituintes do processo produtivo e respetivos tempos de ciclo	43
Tabela 5 – Dados da produção após implementação das melhorias	48

1 Introdução

Neste primeiro capítulo expõe-se o tema desta dissertação, os respetivos objetivos e apresenta-se, brevemente, a empresa. Para além disto, explicita-se a estrutura da dissertação e a metodologia adotada.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

O projeto desenvolvido durante a dissertação surgiu do desconforto da “BorgWarner Viana do Castelo” quanto ao seu conhecimento acerca da variabilidade associada ao ensaio de estanquidade, uma vez que este tem um custo significativo para a empresa, em termos de postos de trabalho e tempo de ciclo e os resultados decorrentes desse ensaio não serem tão credíveis como o esperado (reclamações devido a resultados não-conformes e falsos positivos).

Este projeto é de extrema importância visto que a maioria dos produtos produzidos no “shop floor” são sujeitos diariamente a este ensaio de estanquidade, sendo este um ensaio a 100%. O estudo deste processo poderá traduzir-se em consideráveis diminuições de custos relativos a retrabalho, visto que o conhecimento mais aprofundado sobre este processo permitirá uma medição mais fiável, evitando a repetição do ensaio de peças que não estariam perto do limite de especificação. Também poderá diminuir o número de reclamações provenientes do cliente e, conseqüentemente, aumentar a sua satisfação, pois será menor o risco deste receber peças fora das especificações requeridas. Para além disto, o melhor conhecimento da especificação e da conformidade permitem melhorar o processo e o próprio desenho do produto.

Este ensaio verifica uma especificação chave para o cliente: a fuga de um produto. Se uma possível falha de medição ocorrer e não for detetada quer pela empresa quer pelo cliente, terá um impacto negativo no consumidor em termos de desempenho do produto final.

É também de realçar que a referência estudada é a mais produzida entre as 18 referências que se produzem na linha de produção onde se situa, tendo uma elevada importância para o cliente.

1.2 O Projeto na Empresa “BorgWarner Viana do Castelo”

A “BorgWarner Inc.”, cujo logótipo está representado na figura 1, é uma empresa que atua no setor da produção de peças automóveis. O foco principal da empresa passa pelo desenvolvimento de tecnologias que permitam melhorar o consumo de combustível, as emissões e o desempenho. Com o objetivo de fornecer o devido suporte à diversa base de clientes que possui (figura 2), a “BorgWarner Inc.” está presente em 19 países, num total de 74 localizações¹.

¹ in www.borgwarner.com, acessado em 24/03/2016



Figura 1 – Logótipo da BorgWarner

A “BorgWarner Inc.” opera em 2 grupos: motor e sistema de transmissão. No que diz respeito ao motor, a experiência da “BorgWarner Inc.” conta com a produção de sistemas de temporização do motor, sistemas de ignição, sistemas turbo, gestão de ar e ruído, refrigeração e controlo. A atividade respeitante a este grupo divide-se em: sistemas turbo, sistemas de emissão, sistemas térmicos e sistemas Morse. Relativamente aos sistemas de transmissão, a “BorgWarner Inc.” investe nos produtos relacionados com as transmissões automáticas, com a tração às quatro rodas e com as transmissões de dupla embraiagem. A atividade respeitante a este grupo divide-se em: sistemas de transmissão e sistemas “TorqTransfer”².

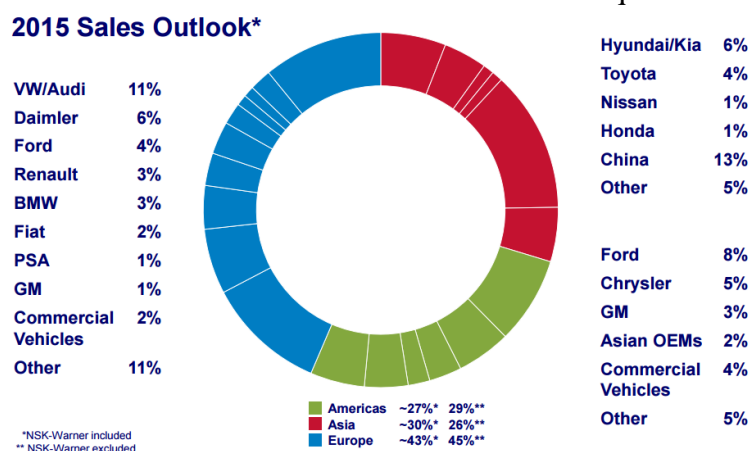


Figura 2 - Panorama das vendas em 2015

A “BorgWarner Viana do Castelo” está localizada no Parque Empresarial de Lanheses (figura 3) desde 2014, empregando cerca de 730 colaboradores. A atividade desta fábrica está direcionada para os sistemas de emissão através da produção de tubos EGR, coolers EGR, módulos EGR e módulos de controlo de velas incandescentes.



Figura 3 - Instalações da “BorgWarner Viana do Castelo”

² in www.borgwarner.com, acedido em 24/03/2016

Ao longo do período da dissertação, o trabalho foi desenvolvido no departamento de qualidade e no laboratório de metrologia. No primeiro procedeu-se a uma investigação sobre os diferentes aspetos a desenvolver no projeto e ao tratamento dos resultados obtidos nas experiências. No laboratório foram realizadas as experiências com vista ao desenvolvimento do projeto. Para além destas, também foram realizadas algumas experiências no “shop floor”.

1.3 Objetivos do projeto

Tendo em vista a implementação de melhorias e soluções para o problema apresentado e tendo em consideração a duração para desenvolvimento do projeto, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Validar o sistema de medição (MSA);

Este objetivo é fundamental para o desenvolvimento do projeto, visto que este sistema de medição irá ser utilizado ao longo de todo o estudo. Deste modo, pretende-se saber se é fiável e apurar se o dispositivo é uma fonte de variabilidade presente na medição em questão, além da variabilidade que se irá estudar ao longo do projeto relativa ao produto e processo.

- Otimizar tempo ciclo;

Pretende-se estudar a influência da parametrização das fases constituintes do ensaio no valor de fuga. Este valor pretende-se que seja estável dadas essas parametrizações, tendo em conta o tempo de ciclo disponível na linha de produção.

- Reduzir retrabalho de repetição do ensaio devido a resultados não-conformes;

Todas as peças que são sujeitas ao ensaio de estanquidade cujo resultado da primeira medição se encontra fora da especificação do cliente, são novamente sujeitas ao ensaio até um máximo de três repetições. Com este projeto, pretender-se-á reduzir a variabilidade associada a este processo, permitindo uma medição mais fiável e, conseqüentemente, atingir a redução desta repetição, eliminando os casos onde a medição ditava que a peça era má quando de facto não era.

- Reduzir reclamações de cliente;

Dados históricos da empresa indicam que existe uma relação entre a percentagem de retrabalho, sucata e o número de reclamações de cliente. Uma redução na percentagem de retrabalho e sucata tem como consequência um menor número de reclamações de cliente. Como um dos principais objetivos do trabalho é reduzir a percentagem de uma das causas do retrabalho e, por sua vez, a percentagem de sucata já se encontra num nível baixo, é plausível que o número de reclamações de cliente a longo prazo diminua.

- Criar “Guidelines” para novos projetos;

Neste projeto foi estudado um tubo EGR. No futuro, a empresa pretende estudar este ensaio de estanquidade nos restantes produtos produzidos na fábrica (outros tubos EGR, coolers EGR e módulos de controlo de velas incandescentes). Esses novos projetos terão como base o trabalho desenvolvido na dissertação.

- Transversalização.

Ao longo do trabalho realizado, é esperado que as conclusões que se venham a obter através das experiências efetuadas, sejam usadas para implementar melhorias na linha de produção, não só na referência alvo de estudo como noutras referências da mesma linha. Também é esperado que a transversalização aconteça para outras linhas de produção.

1.4 Método seguido no projeto

A presente dissertação foi organizada de acordo com as fases do modelo DMAIC da metodologia Seis Sigma (figura 4). Deste modo, o planeamento do projeto dividiu-se em 5 fases (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar), explicitando as tarefas principais associadas a cada uma. Estabeleceu-se a duração de cada tarefa por sugestão do orientador da empresa e avaliou-se semanalmente o progresso do projeto. Esse planeamento anteriormente referido é detalhado no Anexo A.

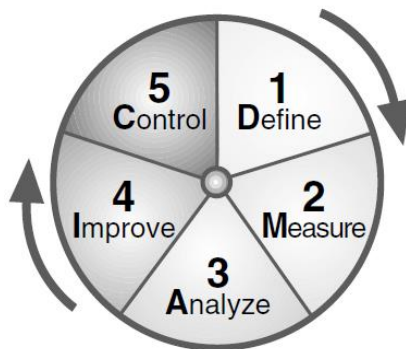


Figura 4 - Fases do modelo DMAIC (Ginn e Varner 2004)

1.5 Estrutura da dissertação

A estrutura da presente dissertação está dividida em 5 capítulos.

No seguimento deste capítulo introdutório, no segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica acerca do Seis Sigma, que constitui a base teórica do trabalho desenvolvido ao longo do projeto. Desta forma, são revistas as ideias subjacentes ao Seis Sigma, incluindo os seus modelos, o seu efeito na inovação e desempenho nas empresas e a sua integração com o “Lean Management”. Também é feita uma descrição de ferramentas usadas ao longo do projeto como a validação de sistemas de medição, teste de hipóteses e desenho de experiências.

No terceiro capítulo, é apresentada a peça estudada ao longo do projeto, o seu processo produtivo e dados relativos à sua produção no início da dissertação. É feito um enquadramento do ensaio de estanquidade no processo produtivo apresentado. Posteriormente, é apresentada uma descrição do ensaio, são identificadas as suas fases, os seus modos de ensaio e os procedimentos usados na linha de produção para realização do ensaio. Neste capítulo está também contida a primeira fase do modelo usado, onde se explicita o âmbito do projeto e descreve-se o problema que será alvo de estudo.

No quarto capítulo, são explicadas as restantes fases do modelo, apresentando as etapas constituintes de cada e as melhorias sugeridas para solucionar ou minimizar os problemas enumerados no capítulo anterior.

No último capítulo, é feita a análise dos resultados obtidos e apresentadas as conclusões finais do trabalho realizado. Também são feitas algumas considerações relativamente a trabalhos futuros.

2 Enquadramento teórico

2.1 Definição do Seis Sigma

O conceito Seis Sigma começou na “Motorola Corporation” em meados da década de 1980. Esta empresa concentrou o seu foco na criação de estratégias para reduzir os defeitos nos seus produtos e, em 1988 estava entre o primeiro grupo das organizações que ganharam o prémio “Malcolm Baldrige National Quality” (Brassard et al 1994).

O Seis Sigma é uma aplicação rigorosa, focada e altamente eficaz dos princípios e técnicas de qualidade. Implementando elementos provenientes do trabalho de vários pioneiros da qualidade, o Seis Sigma tem como objetivo atingir a ausência de erros no desempenho do processo (Pyzdek 2003).

Sigma, σ , é uma letra do alfabeto Grego usada na estatística para medir a variabilidade de um dado processo, mais concretamente o seu desvio padrão. Em projetos Seis Sigma, o desempenho de uma empresa é medido pelo nível sigma do seu “processo de negócio” (dispersão do processo dentro dos intervalos de especificação). Quanto mais alto for o valor de sigma, melhor é o desempenho do processo relativamente aos requisitos do cliente (Pyzdek 2003).

Além de ser uma medida estatística de variabilidade, o Seis Sigma, do ponto de vista dos negócios, é definido como uma estratégia usada para melhorar a rentabilidade do negócio, aumentar a eficácia e a eficiência de todas as operações para cumprir ou exceder as necessidades e expectativas dos clientes (Abreu 2011).

Uma organização, que aplica esta metodologia, define um nível de Seis Sigma (não superior a 3,4 defeitos por milhão de oportunidades [DPMO]) como uma meta de qualidade para os produtos e serviços que fornece aos seus clientes.

Os vários benefícios do Seis Sigma e da aplicação das suas metodologias incluem:

- Melhoria das relações com o cliente;
- Melhoria da eficiência e eficácia dos processos, alinhando-os com as necessidades dos clientes;
- Desenvolvimento de novos processos que atendam às necessidades críticas dos clientes;
- Foco de atenção na gestão de processos a todos os níveis organizacionais;
- Minimização da influência política, prevalecendo a atitude “mostra-me os dados”.

Dois elementos essenciais estão implícitos na definição do Seis Sigma (Ginn e Varner 2004):

- Definição clara dos requisitos do cliente;
- Compreensão do trabalho da empresa do ponto de vista dos processos.

O Seis Sigma é a aplicação do método científico à conceção e operação dos sistemas de gestão e dos “processos de negócio”, permitindo que os operadores efetuem operações de valor acrescentado no âmbito da relação com o cliente. O método científico aplica-se da seguinte forma: (Pyzdek 2003)

1. Observa um importante aspeto do mercado ou do próprio negócio;
2. Desenvolve uma tentativa de explicação, ou hipótese, consistente com as observações;
3. Faz previsões tendo por base a hipótese;
4. Testa as previsões, conduzindo experiências ou efetuando observações de forma mais cuidada. Regista essas observações. Modifica as hipóteses com base nos novos factos. Se existir variação, usa ferramentas estatísticas para ajudar a separar o sinal do ruído;
5. Repete os passos 3 e 4 até não existir discrepância entre as hipóteses e os resultados provenientes das experiências ou observações.

É de notar, contudo, que esta descrição refere-se apenas a uma parte do método científico, uma vez que este é mais abrangente na medida em que permite colocar questões para além do âmbito dos problemas de uma instituição. Contudo, é relevante referi-la visto que é a base científica dos modelos existentes nesta metodologia.

2.2 Níveis Sigma

Os valores de Sigma ajudam a estabelecer “baselines”, metas e objetivos para que o progresso de um produto ou processo possa ser medido. Os valores de Sigma podem ser usados para comparar diferentes produtos, serviços ou divisões dentro de uma organização (Six Sigma Academy 2002).

Tradicionalmente, as empresas aceitam um nível Sigma de três ou quatro, possuindo processos que criem, a longo prazo, entre 67000 a 6200 defeitos por milhão de oportunidades (Brassard et al 1994)!

Quando um processo opera num nível Seis Sigma, a variabilidade é tão pequena que os produtos/serviços resultantes estão, a longo prazo, 99,9997% livres de defeitos.

Para melhorar o nível Sigma do processo, deve-se diminuir a variabilidade e assegurar que o processo está orientado apropriadamente. A diminuição de variabilidade proporciona (Ginn e Varner 2004):

- Melhoria da previsibilidade do processo;
- Menor desperdício e retrabalho, com menores custos;
- Maior satisfação do cliente.

Na figura 5, está representado um processo centrado e normalmente distribuído. À medida que o nível sigma do processo (dispersão do processo dentro dos limites de especificação) aumenta, a percentagem de produtos em conformidade aumenta e as não-conformidades por milhões de partes decrescem. Caso o processo possua um nível 6σ , a curto prazo, isto significará que terá 0,002 não-conformidades por milhões de partes ou uma percentagem de produtos em conformidade na ordem dos 99,9999998%. É, de notar, que um produto é considerado defeituoso se se encontrar fora dos limites de especificação superior (LSE) ou inferior (LIE).

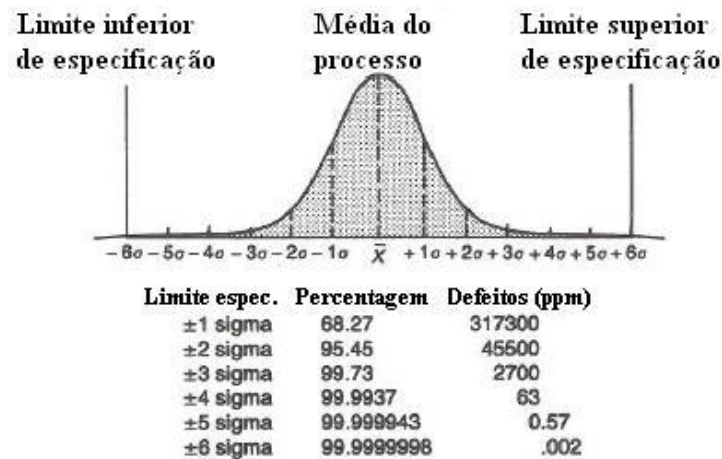


Figura 5 – Representação de um processo centrado e normalmente distribuído (Abreu 2011)

A longo prazo, como mostra a figura 6, considera-se que a média de um processo estável tende a variar $\pm 1,5\sigma$. Quando isso acontece, ou o LIE ou o LSE passam a distar $4,5\sigma$ da média do processo. Isto resulta em 3,4 não-conformidades por milhões de partes e 99,99966% dos produtos conforme as especificações.

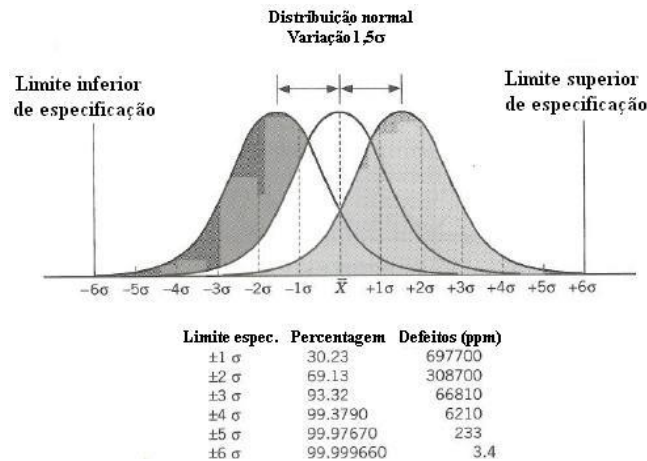


Figura 6 – Representação da variação da média de um processo estável e seus efeitos nos defeitos e % de conformidade (Abreu 2011)

O nível sigma é uma métrica utilizada para descrever a capacidade de um processo para cumprir as especificações, e quanto mais alto for esse valor melhor é o desempenho do processo e menor é a probabilidade de ocorrerem defeitos. Um processo que possua um nível 6σ , terá um índice de capacidade do processo (C_p) de dois (Abreu 2011).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{12\sigma}{6\sigma} = 2,00 \quad (2.1)$$

Os defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) ou não-conformidades por milhões de partes (ppm) são métricas utilizadas para definir a qualidade dos processos. No cálculo do DPMO é considerado o número de defeitos, o número de peças avaliadas e o total de oportunidades de ocorrência de defeitos. Um defeito é definido como uma não-conformidade de uma dada característica relativamente à sua especificação. Uma oportunidade é definida como qualquer possibilidade de não conformidade ou não cumprimento das especificações requeridas. Quanto mais baixo o DPMO, maior é o nível sigma, ou seja, menos defeitos e melhor qualidade dos produtos ou serviços (Abreu 2011).

$$DPMO = \frac{N^{\circ} \text{ de defeitos}}{\text{Total de oportunidades} \times N^{\circ} \text{ de peças}} \times 1000000 \quad (2.2)$$

No cálculo dos ppm apenas é considerado o número de defeitos e o número de peças avaliadas. O objetivo para qualquer processo é não possuir ppm pois quanto menor o valor do ppm melhor é a qualidade dos produtos.

$$ppm = \frac{N^{\circ} \text{ de defeitos}}{N^{\circ} \text{ de peças}} \times 1000000 \quad (2.3)$$

A diferença entre os dois reside no grau de detalhe da métrica. A métrica DPMO compreende a possibilidade de uma peça sob inspeção conter múltiplos defeitos do mesmo tipo ou múltiplos tipos de defeitos.

Em relação ao rendimento do processo, para processos com várias etapas este é obtido pelo produto dos rendimentos de cada etapa. Por exemplo, se um processo for constituído por 2 etapas, na qual os rendimentos são de 80% e 90% respetivamente, o rendimento global será de 72%. Considerando a complexidade dos processos modernos, é fácil entender que a qualidade segundo o Seis Sigma não é opção, mas sim uma exigência se a organização pretender manter-se em atividade (Pyzdek 2003).

No Anexo B, é apresentada uma tabela que apresenta a correspondência entre rendimento, nível sigma a curto e longo termo e defeito por milhão de oportunidades

2.3 Modelos do Seis Sigma

Segundo Ginn e Varner (2004), para alcançar o Seis Sigma, uma empresa deve-se destacar na gestão dos processos já existentes (gestão de processos), na melhoria dos processos existentes (DMAIC) e na conceção de novos produtos, serviços e processos (DMADV). A articulação destes três prova ser a forma mais eficaz para uma organização atingir as suas metas Seis Sigma.

A gestão de processos em curso inclui a monitorização e controlo dos processos da organização. Esta gestão é um recurso tanto para novas melhorias e conceções de projetos como para os sistemas que suportam e mantém as soluções dos projetos (Ginn e Varner 2004).

De seguida, serão apresentadas com maior detalhe os dois modelos ligados ao Seis Sigma.

2.3.1 Modelo DMAIC

O modelo DMAIC é usado quando o objetivo do projeto pode ser alcançado através da melhoria de um produto, processo ou serviço já existente.

Este modelo define-se em 5 fases: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar.

Na fase Definir, pretende-se definir os objetivos da atividade de melhoria que se pretende iniciar. Os objetivos mais importantes são os obtidos através do cliente. Os objetivos prioritários serão os objetivos estratégicos da organização, tal como aumentar a lealdade do consumidor, atingir um melhor retorno sobre o investimento (ROI) ou aumentar a quota de mercado, ou aumentar a satisfação dos colaboradores. No que diz respeito ao nível operacional, um objetivo poderá ser aumentar o rendimento do departamento de produção. Quanto ao nível de projeto, um objetivo poderá ser reduzir o nível de defeitos e aumentar o rendimento de um determinado processo. Esta fase também pretende obter objetivos através da comunicação constante entre os consumidores e os diferentes elementos pertencentes à

organização (Pyzdek 2003). Nesta fase, também é definida a equipa de suporte ao projeto e a variável ou as variáveis dependentes em estudo.

Na fase Medir, pretende-se medir o atual sistema. São estabelecidas métricas válidas e fidedignas de modo a ajudar a monitorizar o progresso para os objetivos definidos na fase anterior (Pyzdek 2003). É fundamental que o sistema de medição seja estatisticamente validado. Para tal, é efetuado um estudo que quantifica quanto da variação observada advém desse sistema e determina se o sistema de medição atualmente usado é fiável.

Na fase Analisar, pretende-se analisar o sistema de modo a identificar formas de eliminar a distância entre o desempenho atual de um sistema ou processo e o objetivo desejado/estabelecido (Pyzdek 2003). O processo ou sistema é estudado, os potenciais inputs são identificados e, posteriormente, os inputs chave são identificados, avaliando-se e definindo-se a relação entre a variável dependente e esses inputs.

Na fase Melhorar, pretende-se melhorar o sistema. São implementadas ações de melhoria que tenham um impacto positivo na variável dependente em estudo. O desenho de experiências tem um papel fundamental na realização desta fase uma vez que irá permitir a otimização de múltiplos “outputs”, como por exemplo, o valor médio, a variabilidade entre medições e o tempo de ciclo. Nesta fase, é ainda realizada uma nova análise ao renovado processo ou sistema.

Na fase Controlar, pretende-se controlar o sistema. São implementadas ações para controlar o processo e monitorizar o desempenho durante um definido período de tempo após o final do projeto. É possível usar normas como a ISO 9000 para assegurar que a documentação está correta e ferramentas estatísticas para monitorizar a estabilidade do novo sistema (Pyzdek 2003).

2.3.2 Modelo DMADV

O modelo DMADV é usado para a conceção de novos produtos, processos ou serviços, ou para o completo redesenho das já existentes.

Este modelo define-se em 5 fases: Definir, Medir, Analisar, Projetar, Verificar.

Na fase Definir, pretende-se definir os objetivos da atividade de conceção/projeto. É necessário questionar e saber o que está a ser concebido e qual a razão para tal. É usado o QFD (“quality function deployment”) ou o processo hierárquico analítico (AHP) para assegurar que os objetivos são consistentes com a procura do consumidor e com a estratégia da organização (Pyzdek 2003).

Na fase Medir, determina-se as métricas críticas para as partes interessadas. Os requisitos do consumidor são traduzidos em objetivos do projeto (Pyzdek 2003).

Na fase Analisar, são gerados uma série de conceitos, isto é, ideias ou soluções para o processo, produto ou serviço que está a ser concebido, avaliam-se e selecionam-se os que melhor cumprem os objetivos dentro das limitações de orçamento e recursos. Determina-se o desempenho de projetos de sucesso semelhantes (Ginn e Varner 2004).

Na fase Projetar, projeta-se o novo produto, serviço ou processo. São usados modelos preditivos, simulação, protótipos, entre outros, para validar a eficiência do desenho do conceito para que se alcance os objetivos (Pyzdek 2003).

Na fase Verificar, testa-se o protótipo, implementa-se a conceção final e verifica-se a eficiência desta no mercado atual (Ginn e Varner 2004).

2.3.3 Visão geral dos dois modelos

Na figura 7 é esquematizado o anteriormente referido sobre as etapas de cada modelo.

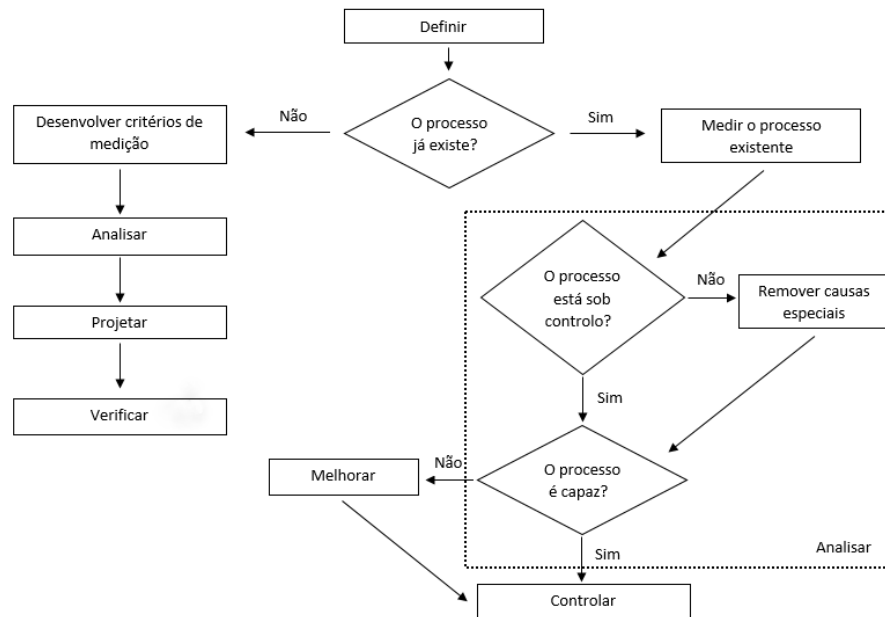


Figura 7 - Visão geral dos modelos DMAIC e DMADV (adaptado de Pyzdek 2003)

2.4 Efeito do Seis Sigma na inovação e no desempenho da instituição

O programa Seis Sigma foca-se na redução da variabilidade dos processos e rotinas da organização. A aplicação do modelo DMAIC ajuda estes programas a identificar a causa dos problemas, a procurar as soluções e a melhorar o processo.

Deve notar-se que, na busca de melhorias de rotinas e processos das organizações, os esforços dos programas Seis Sigma são primariamente focados na melhoria da eficiência dentro de uma base tecnológica já existente na empresa (Parast 2011). Deste modo:

- Os programas Seis Sigma afetam positivamente a inovação incremental na empresa.

Segundo Parast (2011), o Seis Sigma não muda a integridade e interconexão dos processos organizacionais, mas pelo contrário, melhora-os. Deste modo:

- Os programas Seis Sigma afetam positivamente a inovação modular na empresa.

O Seis Sigma é um conceito que se foca no consumidor em vez do produto. O alvo prioritário dos seus esforços de melhoria são os consumidores já existentes. Informação e dados sobre os existentes consumidores são recolhidos e analisados de modo que os projetos Seis Sigma sejam definidos para melhorar os processos sempre com o foco na satisfação dos requisitos destes consumidores. As organizações esforçam-se por reduzir ou eliminar o número de reclamações provenientes dos seus clientes tendo como perspetiva que um menor número de reclamações significará uma maior satisfação do consumidor. Isto resultará na introdução de novos produtos e/ou serviços orientados para os clientes já existentes (Parast 2011). Assim:

- Os programas Seis Sigma melhoram a satisfação e a inovação para os consumidores já existentes.

Na busca pelas melhorias dos processos, as organizações melhoram os seus produtos/serviços já existentes para que correspondam ou excedam as expectativas do consumidor. Tais melhorias incrementais podem atrair novos consumidores devido às mudanças feitas no produto (Parast 2011). Deste modo:

- Os programas Seis Sigma podem atrair novos consumidores.

Assim, na fase inicial de implementação do Seis Sigma, as organizações têm a oportunidade de reforçar a sua carteira de clientes, quer através do foco nos clientes já existentes, quer atendendo às necessidades dos novos consumidores. O desafio para as empresas nesta fase inicial resume-se à decisão entre continuar os seus esforços na melhoria dos seus produtos/serviços (focando-se nos clientes existentes) ou reestruturar os processos já existentes (visando novos consumidores). Portanto, é expectável que nesta fase do projeto Seis Sigma, as organizações desenvolvam as suas capacidades para desenvolver novos produtos ou serviços. Estes estarão dentro da trajetória tecnológica já existente da empresa (inovação incremental), na qual o modelo DMADV é por natureza focado (Parast 2011).

Para retirar o melhor proveito dos programas Seis Sigma, as organizações necessitam de abordar cuidadosamente as necessidades dos consumidores atuais, enquanto monitorizam a formação de novos mercados e/ou clientes (Parast 2011).

2.5 Lean Seis Sigma

Nas últimas décadas, as organizações têm dado especial relevância aos programas de melhoria contínua, sendo os mais populares o Seis Sigma e o “Lean Management”. Como já referido anteriormente, o Seis Sigma teve origem nos Estados Unidos da América através da Motorola, enquanto o “Lean Management” na Toyota, Japão. A chave no desenvolvimento do Seis Sigma está na necessidade de melhoria da qualidade dos produtos ou serviços enquanto o “Lean Management” visa a eliminação de todos os desperdícios (Abreu 2011).

Algumas organizações adotaram as duas filosofias, integrando o “Lean” com o Seis Sigma, o Lean Seis Sigma. Este método consiste em adotar o “Lean Management” combinado com a lógica e a dinâmica de progresso proporcionada pelo Seis Sigma (Abreu 2011).

Na figura 8 é apresentado uma comparação entre a aplicação das metodologias Seis Sigma, “Lean Management” e Lean Seis Sigma.

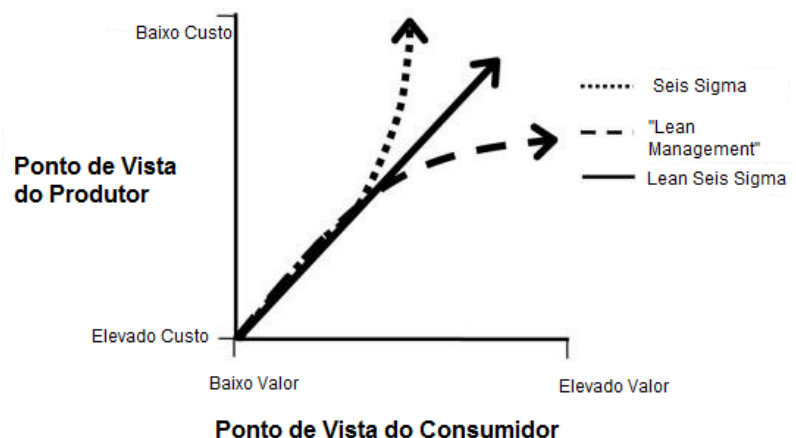


Figura 8 - Vantagem competitiva do Lean Seis Sigma (adaptado de Arnheiter e Maleyeff 2005)

No eixo horizontal está representada a perspetiva de valor para o consumidor, na qual se inclui a qualidade do produto e o desempenho na entrega deste. No eixo vertical estão representados os custos que o produtor possui para entregar um produto ou serviço ao consumidor. Em quaisquer dos sistemas, melhorias irão ser efetuadas, mas estas irão estabilizar após um determinado tempo. Apenas com a aplicação do Seis Sigma, esta estabilização poderá ser devida à ênfase na otimização de métricas de qualidade mensuráveis, ignorando as mudanças que se poderiam efetuar nos sistemas operacionais para remover atividades desnecessárias. Apenas com a aplicação do “Lean”, esta estabilização poderá ser

devida à ênfase na racionalização do fluxo do produto, ignorando o tratamento de dados e o uso de métodos de controlo de qualidade estatísticos. Desta forma, uma organização deve aplicar as duas filosofias em conjunto, capitalizando os pontos fortes de ambas para que estas melhorias não estabilizem (Arnheiter e Maleyeff 2005).

Uma organização Lean Seis Sigma deve incluir os seguintes dois princípios primários “Lean” (Arnheiter e Maleyeff 2005):

- Deve incorporar uma filosofia predominante que procure maximizar o conteúdo de valor acrescentado para todas as operações;
- Deve incorporar uma gestão de processos de tomada de decisão que baseie todas as decisões no seu relativo impacto no consumidor.

Por outro lado, também deve incluir os seguintes três princípios primários do Seis Sigma (Arnheiter e Maleyeff 2005):

- Deve promover metodologias que procurem minimizar a variação das características de qualidade;
- Deve projetar e implementar um regime de educação e formação altamente estruturado e que abranja toda a empresa;
- Deve ter em conta metodologias que analisem dados nas tomadas de decisão para que as mudanças sejam baseadas em dados científicos.

2.6 Validação do Sistema de Medição

Os sistemas de medição, se não funcionarem apropriadamente, podem ser uma fonte de variabilidade que afetam negativamente a capacidade do processo. Se a medição é uma fonte de variabilidade, as empresas tanto podem aceitar maus itens como rejeitar bons itens. Deste modo, é necessário saber se o sistema de medição é fiável antes de determinar uma “baseline capability”. Existem dois tipos de análise do sistema de medição, uma para dados por atributos e outra para dados por variáveis (Six Sigma Academy 2002).

A análise do sistema de medição é um tipo de simulação onde é feita a medição de um determinado item repetidamente usando diferentes operadores ou ferramentas do equipamento de medição. Esta análise é usada para quantificar a variação de uma medição proveniente do sistema de medição. É usualmente usada na fase “Medir” do modelo DMAIC para avaliar se é necessário melhorar o sistema de medição antes de efetuar a recolha de dados (Brassard et al 1994).

Através desta validação, é possível saber quanto da variação observada advém do sistema de medição, determinar os modos como é possível melhorá-lo e avaliá-lo tendo em conta as seguintes características (Six Sigma Academy 2002; ISO 2008):

- Desvio – É a diferença entre o valor médio observado das medições e um standard conhecido. Se existir desvio no valor médio medido, o sistema de medição pode requerer calibração;
- Linearidade – Determina se existe desvio no sistema de medição ao longo da gama de operação;
- Repetibilidade – É o grau de concordância entre os resultados de medições consecutivas do mesmo mensurado, realizadas sob as mesmas condições de medição;
- Reprodutibilidade – É o grau de concordância entre os resultados de medições do mesmo mensurado, realizadas sob condições diferentes de medição;

- Estabilidade – Determina a aptidão do sistema de medição para medir consistentemente ao longo do tempo;
- Resolução – É a aptidão para detetar pequenas mudanças na característica medida.

Qualquer medição de uma peça além de medir o valor real desta também mede alguma variabilidade que possa existir devido à fraca repetibilidade do medidor e/ou devido à pobre reprodutibilidade dos operadores e respetivos métodos de medição. É desejável determinar o valor real da peça livre de qualquer fonte de variação para que seja possível determinar a verdadeira capacidade do processo. Um teste conhecido como “Gage Repeatability & Reproducibility” (Gage R&R) é realizado para determinar se existe variação excessiva no sistema de medição. É concebido de tal modo que as fontes de variabilidade existentes no sistema de medição, nas quais se inclui a variabilidade total, a variabilidade do produto e a variabilidade do sistema de medição, podem ser divididas tal como mostra a figura 9 (Six Sigma Academy 2002).

Fontes de variabilidade existentes na validação do sistema de medição

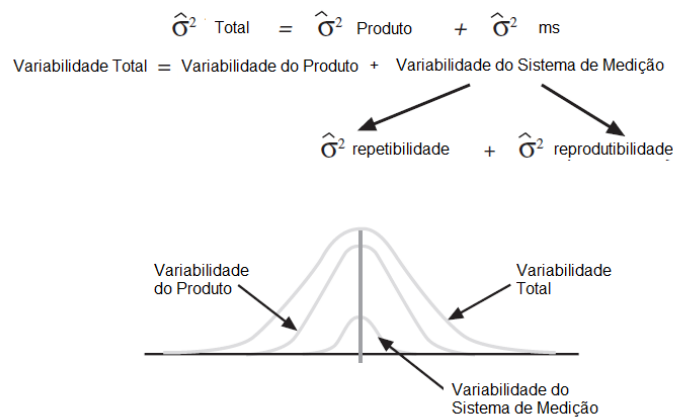


Figura 9 – Fontes de variabilidade de variabilidade no MSA (adaptado de Six Sigma Academy 2002)

Uma vez determinadas todas as variabilidades, a empresa pode determinar se o sistema de medição é fiável. Se o sistema é considerado pouco fiável, estas variâncias podem ajudar a determinar se o problema é a repetibilidade e/ou a reprodutibilidade (Six Sigma Academy 2002).

Na figura 10 são apresentados os critérios de aceitação do teste “Gage R&R”. A percentagem de contribuição é um rácio de variâncias entre a variância do sistema de medição e a variância total observada (Six Sigma Academy 2002).

A precisão para a variação total (P/TV) é o rácio entre o desvio padrão do sistema de medição e o desvio padrão total observado. Esta métrica é usada para determinar se uma empresa consegue medir a variação dos seus processos de forma a validar as suas melhorias processuais através dos testes de hipóteses (Six Sigma Academy 2002).

A precisão para a tolerância (P/T) é o rácio entre 5.15 vezes o desvio padrão do sistema de medição e a tolerância, isto é, a diferença entre o limite superior de especificação e o limite inferior de especificação. Esta métrica é usada para determinar se uma empresa consegue aceitar ou rejeitar apropriadamente um produto. O valor 5.15 é o número de desvios padrões necessários para capturar 99% da variação (Six Sigma Academy 2002).

Critérios de aceitação do teste "Gauge R&R"			
	% Contribuição	% P/TV	% P/T
	$\frac{\hat{\sigma}^2 ms}{\hat{\sigma}^2 Total} \times 100$	$\frac{\hat{\sigma} ms}{\hat{\sigma} Total} \times 100$	$\frac{5.15 \times \hat{\sigma} ms}{Tolerância} \times 100$
Aceitável	<9%	<30%	<30%
Bom	<4%	<20%	<20%
Excelente	<1%	<10%	<10%

Figura 10 - Critérios de aceitação do teste "Gauge R&R" (adaptado de Six Sigma Academy 2002)

Para se realizar o teste "Gage R&R" deve-se (Six Sigma Academy 2002):

- Identificar a característica do item a ser medida, o instrumento de medição e os operadores que irão realizar a medição;
- Identificar o número de itens (tipicamente 10) que abranjam a gama de variabilidade a longo prazo do processo;
- Realizar o teste "Gage R&R" no ambiente onde a medição é feita diariamente;
- Estimar a repetibilidade e a reprodutibilidade, realizando o teste com três operadores e dez itens. Cada item necessita de ser medido pelo menos duas vezes por cada operador;
- Calcular as variâncias através do método ANOVA;
- Interpretar os resultados graficamente e analiticamente para determinar se o sistema de medição é aceitável, necessita de ser reparado ou deve ser substituído.

2.7 Teste de Hipóteses

Segundo a Six Sigma Academy (2002), o teste de hipóteses ajuda uma organização a determinar se uma mudança aplicada num "input" do processo pode mudar significativamente o "output" do processo e a verificar estatisticamente se há diferenças entre dois ou mais "outputs" do processo.

Este teste auxilia na utilização de dados amostrais para tomar decisões sobre parâmetros da população como médias, desvios padrões e proporções.

Quando uma organização toma uma decisão com base no teste de hipóteses, não é possível saber se a decisão foi correta ou errada devido à variação da amostragem. Independentemente da quantidade de vezes que são retiradas amostras da mesma população, nunca se irá obter a mesma média, desvio padrão ou proporção. A principal questão é se as diferenças observadas são resultado de mudanças ocorridas na população, ou resultado da variação da amostragem. Estes testes estatísticos são usados porque foram concebidos para minimizar o número de vezes que uma organização pode tomar uma decisão errada (Six Sigma Academy 2002).

Há dois tipos de erros que podem ser cometidos no teste de hipóteses:

- Concluir que uma população sofreu uma mudança quando, de facto, tal não ocorreu;
- Concluir que uma população não sofreu uma mudança quando, de facto, tal ocorreu.

O primeiro erro é conhecido como erro do tipo I, enquanto o segundo como erro do tipo II. A probabilidade associada a cometer um erro do tipo I é conhecida como alfa (α) e a de cometer um erro do tipo II é conhecida como beta (β). É também usual usar-se o poder de teste ($1-\beta$), que representa a aptidão do teste para detetar uma mudança na população.

Além destas duas probabilidades, é relevante referir o “P-Value” como sendo a probabilidade da estatística de teste tomar valores iguais ou mais extremos ao valor observado de uma dada amostra quando a hipótese nula é verdadeira (Montgomery 2001).

O teste de hipóteses é realizado segundo os seguintes passos:

- Definir o problema a ser estudado;
- Definir o objetivo;
- Formular a hipótese nula, identificada como H_0 ;

A hipótese nula é uma igualdade entre as duas populações. O objetivo do teste é rejeitar ou não esta hipótese.

- Formular a hipótese alternativa, identificada como H_a ;

A hipótese alternativa é o que se pretende provar. Para tal, há 3 alternativas: teste bilateral, teste unilateral à esquerda e teste unilateral à direita.

- Determinar a “practical difference” (δ);

Este parâmetro representa a diferença que se pretende detetar entre o parâmetro das duas populações.

- Estabelecer os riscos α e β para o teste;
- Determinar o número de amostras necessárias para obter o risco β desejado;
- Recolher as amostras e efetuar o teste para determinar o “P-value”;
- Comparar o “P-value” com o critério de decisão (risco α).

Se o valor do “P-value” for inferior ao risco α , a hipótese nula é rejeitada. Se o valor do “P-value” for superior ao risco α , não há evidência estatística para rejeitar a hipótese nula.

Se o pretendido for comparar variâncias, utiliza-se o “1 Variance Test”, “2 Variance Test” e “Test for equal variances”. O primeiro utiliza-se quando se pretende comparar uma amostra com um standard, o segundo duas amostras e o terceiro múltiplas amostras. Na comparação de médias utiliza-se o “1-Sample t-test”, “2-Sample t.test”, “Paired t-test” e “One-way ANOVA”. O primeiro utiliza-se quando se pretender comparar uma amostra com um standard, o segundo duas amostras independentes, o terceiro duas amostras dependentes e o quarto múltiplas amostras. Na comparação de proporções, utiliza-se o “1 Proportion Test”, o “2 Proportion Test” e o “Chi-Square Test”. O primeiro utiliza-se quando se pretender comparar uma amostra com um standard, o segundo duas amostras e o terceiro múltiplas amostras.

2.8 Desenho de experiências (DOE)

O desenho de experiências é um método de análise de dados, onde é possível alterar a configuração dos parâmetros constituintes do processo para averiguar o efeito dessa mudança no “output” do processo em questão. Também permite alterar múltiplas configurações simultaneamente e averiguar o consequente efeito.

Esta abordagem permite explorar eficaz e eficientemente a relação entre as múltiplas variáveis do processo (x) e o “output” ou as variáveis de desempenho do processo (y). Esta ferramenta é usada na fase “Analisar” do modelo DMAIC para identificar e quantificar os fatores chave de variação e na fase “Melhorar” para selecionar as soluções mais eficazes de todas as possibilidades (Brassard et al 1994).

Através do desenho de experiências, é possível:

- Identificar as fontes vitais de variação (x) – fatores que têm o maior impacto nos resultados;
- Identificar os x que têm menor efeito nos resultados;
- Quantificar o efeito dos importantes x, incluindo as suas interações;
- Apresentar uma equação que quantifica a relação entre os x e os y;
- Prever a perda ou ganho que resultará de mudanças nas condições do processo.

O Seis Sigma usa diferentes tipos de desenho de experiências nas melhorias de processo, tais como:

- “Two-level fractional factorial” – usado para identificar os x vitais entre um número elevado de potenciais fatores;
- “Two-level full- and high-resolution” – usado para entender como os fatores importantes atuam de modo a influenciar o “output”;
- “Taguchi” – usado para descobrir a configuração ótima dos fatores que otimiza a variabilidade da resposta (y). É usado quando se conhece bem o processo pois assume-se a impossibilidade de existirem algumas interações entre fatores;
- “Response surface methodology” – usada para determinar configurações ótimas dos fatores importantes próximo de um ponto ótimo.

Para executar um desenho de experiências é necessário seguir os seguintes passos:

1. Obter informação antecedente respeitante ao problema em questão;
2. Identificar as respostas mensuráveis (y), fatores (x) e os níveis dos respetivos fatores;
 - Considerar todos os pares de fatores que possam interagir entre eles;
 - Rever as combinações dos fatores tendo em conta os níveis estipulados de modo a verificar se há impossibilidades ou problemas devido a essas combinações.
3. Selecionar o tipo de desenho de experiências apropriada para o nível de conhecimento atual do problema;
 - Decidir o número de ensaios experimentais a realizar;
 - Se possível, fazer réplicas (repetição das combinações), o que permitirá obter uma melhor estimativa do erro de medição;
 - Permitir que as combinações sejam geradas de forma aleatória sempre que possível, de modo a permitir distribuir o efeito de variáveis ruído desconhecidas por todos os fatores;
 - Considerar a necessidade de “blocking”. O “blocking” permite estudar os efeitos dos fatores ruído e remover potenciais efeitos resultantes de um fator ruído conhecido. Por exemplo, se uma série de experiências necessita de 8 experiências para ser completa, mas há somente matéria prima para executar 4 experiências, haverá, naturalmente, uma preocupação relativa à obtenção de diferentes resultados devido aos lotes diferentes de material. Para prevenir que essas eventuais diferenças influenciem os resultados da experiência, o desenho de experiências será realizado em 2 blocos com o “lote de material” considerado como um fator bloco. A análise determinará se há diferenças estatisticamente significativas entre os dois blocos. Se tal não ocorrer, os blocos podem ser removidos do modelo e os dados podem ser tratados como

um todo. Se os blocos forem significativos, o ruído devido ao “blocking” irá ser minimizado. “Blocking” é um modo de determinar quais as experiências a executar com cada lote de material para que cada efeito resultante das diferenças entre material não influenciem as decisões tomadas sobre os efeitos dos fatores a serem estudados.

4. Recolher os dados;

5. Analisar os dados;

- Se as experiências incluírem réplicas, avaliar médias, desvios padrões e resíduos para cada condição experimental. Os resíduos são uma medida do erro do modelo. Uma equação de previsão estima o “output” de um processo a vários níveis. Estes valores estimados são chamados de “fits”. Um resíduo será a diferença entre o “fit” e um dado atual experimentalmente observado;
- Avaliar os efeitos e as interações dos fatores;
- Desenvolver um modelo de previsão que relacione os fatores com as respostas;

6. Formular, verificar e reportar as conclusões;

7. Implementar melhorias.

No caso do “Two-level fractional factorial”, dependendo do número de fatores que se pretenda testar e do número de experiências que é possível executar, determina-se a resolução do DOE (figura 11). Uma resolução III, é incapaz de separar os efeitos principais das interações duplas. Uma resolução IV é incapaz de separar as interações duplas e separar as interações triplas dos efeitos principais. Uma resolução V é incapaz de separar as interações duplas e as triplas assim como separar as interações quádruplas dos efeitos principais. Por sua vez, o “full” não tem termos confundidos.

	Factors														
Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8		Full	IV	III	III	III									
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Figura 11 – Resolução do DOE tendo em conta o número de experiências e fatores

Para analisar a influência individual ou combinada dos fatores sujeitos ao teste no “output” do processo, assim como para obter um modelo que expresse essa influência utiliza-se a Análise de Variância. Para compreender essa análise, é importante ter conhecimento dos seguintes termos expressos na tabela ANOVA:

- DF - representa os graus de liberdade de cada termo do desenho de experiências;
- Adj SS - representa a contribuição individual ou combinada de cada fator para o modelo, ou seja, é possível quantificar essa contribuição para a variabilidade do processo dividindo esse valor pelo total apresentado no final dessa coluna;
- F-value - distribuição estatística usada para calcular o “P-value”;
- P-value - determina quais os efeitos no modelo que são estatisticamente significativos;
- R-sq - afirma que o modelo apresentado explica uma determinada percentagem da variabilidade dos valores medidos;
- R-sq (adj) - advém do “R-sq” e é usado quando se pretende comparar modelos com diferentes números de termos;

- R-sq (pred) – representa a medida que indica a capacidade do modelo para prever o “output” para novas observações;
- VIF - informa se há correlação entre fatores. Se todos os fatores possuírem um valor de VIF inferior a 5, concluiu-se que nenhum fator está correlacionado.

No final da tabela ANOVA encontra-se a equação do modelo, constituída pelos fatores usados no desenho de experiências.

Para obter os fatores que influenciam o “output” é necessário proceder à redução do modelo inicialmente obtido. Para tal, deve-se rever a tabela ANOVA obtida e eliminar os termos com um “P-value” superior ao nível de significância especificado. Primeiramente elimina-se a combinação entre os três fatores, de seguida a combinação entre 2 fatores e por fim, os efeitos principais. Os termos devem ser removidos individualmente. Geralmente, um valor aceitável para o “R-sq” do modelo é de cerca de 80%, contudo não existe nenhum valor estipulado para definir quando não se deve reduzir mais o modelo. É preferível, por exemplo, eliminar um termo e obter um “R-sq” de 78% do que mantê-lo e ter um “R-sq” de 80%.

3 Descrição e análise da situação atual e apresentação do problema

3.1 Peça ensaiada

A peça ensaiada, um tubo EGR, é usada como meio de ligação de todos os componentes do sistema de recirculação do gás resultante da combustão. O gás é arrefecido pelo “cooler EGR”, e de seguida volta para a câmara de combustão pelo tubo EGR, sem alterações de temperatura. Esta redução e otimização de temperatura dentro da câmara de combustão tem como principal benefício a redução de emissão de NO_x.

Esta peça, cujo desenho técnico está representado no Anexo C, é produzida semanalmente em quantidades que variam dependendo do pedido do cliente. Mensalmente, a produção varia entre 5000 e 18000 peças. O planeamento de produção é realizado no início de cada semana e, geralmente, abrange os três turnos (manhã, tarde e noite).

3.1.1 Mapeamento do Processo Produtivo

O processo produtivo inicia-se com a receção dos elementos constituintes da peça provenientes dos fornecedores da empresa. Estes elementos são: tubo, brida, casquilho, junta, manga de isolamento térmico (anticalórico) e 3 abraçadeiras. Posteriormente, é realizado o fole e as ondas ao tubo através de um processo denominado “hydroforming”. A próxima etapa é constituída pela montagem da brida e do casquilho ao tubo e pela lavagem deste. Após a lavagem, é-lhe aplicada uma pasta para que este prossiga para a brasagem no forno. Em seguida, as peças aguardam algum tempo, não definido, antes de prosseguirem para a próxima etapa. Nesta etapa, procede-se à verificação da peça, isto é, existência de golpes, deformações no fole e presença de 100% de pasta em todo o perímetro da união entre tubo e brida. Também se verifica a geometria da peça, montando-a numa maquete de controlo para verificação de planicidades e posições. Posteriormente, o tubo é sujeito ao ensaio de estanquidade para determinar se a peça está dentro do limite de especificação definido pelo cliente. Em caso afirmativo, são montados os restantes componentes (junta, anticalórico e 3 abraçadeiras) e é feita uma revisão final à peça. A última etapa é referente à expedição desta para o cliente e às auditorias realizadas anualmente ao produto, processo e limpeza. A esquematização do processo produtivo anteriormente referido pode ser consultada no Anexo D.

3.1.2 Dados relativos à produção

Neste subcapítulo, será apresentado um levantamento sobre a produção da peça em estudo no mês de fevereiro. Este levantamento incidirá em 2 aspetos: retrabalho e sucata.

A empresa labora 24 horas por dia distribuída em 3 turnos: manhã, tarde e noite. Foi realizado um levantamento, em cada turno, do número total de peças entradas em linha, do número de peças ok, do número de peças consideradas como sucata, do número de peças consideradas como sucata devido aos reensaio, do número de peças retrabalhadas devido a não-

conformidades da peça e do número de peças reensaiadas. Na tabela 1, são apresentados os dados resultantes desse registo.

Tabela 1 – Dados da produção relativos a fevereiro

	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Total
Nº peças entradas em linha	5519	6891	7484	19894
Nº peças ok	4427	5560	6769	16756
Nº de peças consideradas como sucata	14	18	22	54
<i>Nº de peças consideradas como sucata devido aos reensaio</i>	2	0	0	2
Nº de peças retrabalhadas devido a não-conformidades da peça	236	220	147	603
Nº de peças reensaiadas	842	1093	546	2481
Percentagem sucata	0,25	0,26	0,29	0,27
Percentagem retrabalho devido a não-conformidades da peça	4,28	3,19	1,96	3,03
Percentagem retrabalho devido ao reensaio	15,97	16,43	7,46	12,89

Deve-se ter em atenção que para o cálculo da percentagem de retrabalho devido ao reensaio apenas são consideradas o número de peças ok, o número de peças consideradas como sucata devido aos reensaio e o número de peças reensaiadas.

O retrabalho é, principalmente, quantificado pela repetição do ensaio de estanquidade para uma dada peça. Isto deve-se a um resultado não conforme no primeiro ensaio, mas próximo o suficiente da especificação do cliente para que o segundo ensaio seja realizado. O ensaio da mesma peça poderá ser repetida até 3 vezes. A primeira repetição é executada logo a seguir a ser medida pela primeira vez. Se o resultado dessa repetição for não conforme, a peça segue para o forno, repetindo os procedimentos constituintes dessa etapa, e é posteriormente sujeita ao ensaio de estanquidade. Se o resultado continuar não conforme, o procedimento repete-se e é feito o último ensaio de estanquidade. Se após este resultado final a peça estiver fora da especificação, esta é considerada como sucata.

A falta de pasta aplicada antes da brasagem da peça, a presença de gotas dessa pasta na peça e a marcação NOK são causas do retrabalho devido a não-conformidades da peça resultantes da produção das mesmas. Estas são verificadas na etapa anterior ao ensaio de estanquidade. Este retrabalho está associado à recuperação de peças.

Na figura 12, podemos verificar as causas, em cada turno, que provocaram o retrabalho durante o mês de fevereiro na linha de produção da peça em questão e a sua frequência relativa.

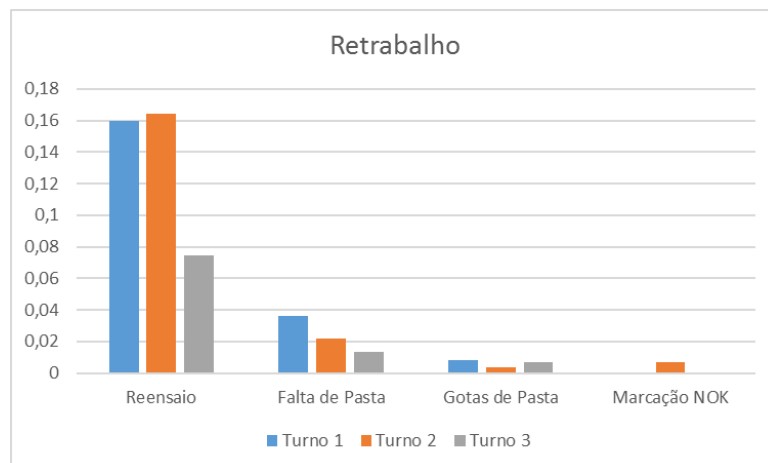


Figura 12 – Causas do retrabalho no mês de fevereiro

No que diz respeito à sucata, esta é, principalmente, quantificada por golpes existentes nas peças ou pela não conformidade da geometria da peça. Na causa “Outros” incluem-se as situações da repetição do ensaio de estanquidade já anteriormente referidas. À exceção desta causa, todas as outras são verificadas na etapa anterior ao ensaio de estanquidade. Neste momento, este indicador não é preocupante na linha de produção da peça estudada. Na figura 13, podemos verificar as causas, em cada turno, que provocaram a sucata durante o mês de fevereiro na linha de produção da peça em questão e a sua frequência relativa.

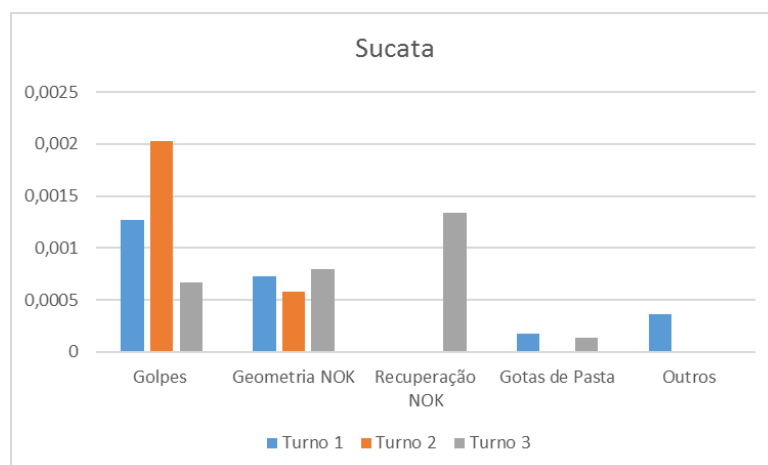


Figura 13 – Causas da sucata no mês de fevereiro

Após a análise dos dados recolhidos, constatou-se que o desenvolvimento do projeto é de extrema importância para reduzir a principal causa do retrabalho na linha de produção em estudo. Constatou-se que o acontecimento de acontecer a terceira repetição do ensaio não é um problema com grande relevo no que diz respeito à sucata e, como tal, o trabalho desenvolvido não terá como foco este indicador. Contudo, aliada à redução do retrabalho, não se pretenderá comprometer os níveis atuais de sucata, mantendo-os próximos de zero.

3.2 Ensaio de estanquidade

Como podemos comprovar no processo produtivo anteriormente explicado no subcapítulo 3.1.1, o ensaio de estanquidade situa-se nas últimas etapas da linha de produção. É um ensaio a 100%, ou seja, é realizado a todas as peças produzidas. Este ensaio está presente quase na totalidade das linhas de produção da empresa, sendo utilizado para verificação de uma especificação chave do cliente. É de extrema importância que a empresa detenha um conhecimento aprofundado sobre este ensaio, não só devido à sua vasta presença nas linhas de produção, mas também para evitar reclamações do cliente devido a não-conformidades.

3.2.1 Descrição do ensaio realizado na “BorgWarner Viana do Castelo”

O ensaio de estanquidade pretende detetar e quantificar uma fuga do produto sujeito ao ensaio. Consiste numa medição de uma variação de pressão entre a peça em teste e uma peça de referência que não apresenta qualquer fuga através de um sensor diferencial. Ambas as peças estão sujeitas à mesma pressão. O resultado deste ensaio, expresso pelo Fugómetro em Pa ou em cm^3 , é comparado com a especificação requerida pelo cliente, determinando-se então se a peça é considerada boa para utilização ou não. Para efetuar tal comparação, é necessário dividir o resultado obtido no aparelho de medição pelo tempo de medição do ensaio visto que a especificação é definida em Pa/S, ou em cm^3/min . Além disso, a pressão à qual se sujeita a peça também é determinada pelo cliente para uma dada referência de produto. Na linha de produção em estudo, é feita a medição de variação de pressão em Pa.

Para que seja possível realizar o ensaio são necessários os seguintes elementos:

- Peça a testar: Peça produzida à qual se irá realizar o controlo de fuga;
- Fugómetro: Equipamento de medição e deteção de fugas utilizado para controlar a estanquidade de uma peça. Mede a variação de pressão existente na peça a testar;
- Ferramenta: Equipamento específico, constituído por suportes e elementos de fixação, usado para fixar e obstruir os orifícios da peça a testar. Inclui dois cilindros pneumáticos que são utilizados para obstrução da peça e para enchimento da peça à pressão requerida. Há dois tipos de Ferramentas: Ferramenta com peça de referência e Ferramenta sem peça de referência;
- Máquina do fugado: Dispositivo utilizado para definir a velocidade de recuo/avanço dos cilindros pneumáticos e para parar o ensaio em casos de emergência;
- Câmara do ensaio: Caixa envolvente que tem como finalidade a proteção do ensaio, tentando manter um ambiente controlado. Também é usada para garantir a segurança do trabalhador, possuindo sensores laterais que param o ensaio quando este ultrapassa essa barreira;
- Peça de referência: Dependendo da Ferramenta utilizada, este elemento poderá ou não existir. Peça sem fugas acoplada à Ferramenta usada como referência para comparação com a peça em teste.

Na figura E1 do anexo E, estão representados os elementos constituintes do ensaio de estanquidade. Este conjunto foi usado para o desenvolvimento do projeto e encontra-se no laboratório de metrologia. No canto superior esquerdo é possível identificar o Fugómetro e ao seu lado a Máquina do fugado. Na parte inferior da figura, é possível identificar a Ferramenta, neste caso sem peça de referência, suportando a peça a testar. Envolvendo a Ferramenta e suportando o Fugómetro e a Máquina do fugado temos a Câmara.

3.2.2 Modos do ensaio

Dependendo da Ferramenta utilizada, o princípio de medição será diferente.

Usando a Ferramenta sem peça de referência (figura E2 do anexo E), é feita uma medição da variação de pressão da peça submetida ao ensaio, ou seja, é medida uma variação de pressão entre o início e o final do ensaio. Como podemos visualizar no canto inferior esquerdo da figura, é utilizado um tampão para que o circuito pneumático esteja fechado.

Usando a Ferramenta com peça de referência (figura E3 do anexo E), é feita uma medição da variação de pressão entre a peça submetida ao ensaio e uma peça de referência igual sem qualquer fuga. Há inicialmente um enchimento de pressão em ambas as peças e, posteriormente, são comparadas as pressões no final do ensaio da peça em teste e da peça de referência. Segundo o fornecedor, o uso de uma peça de referência tem como vantagem a estabilização da pressão mais rapidamente, embora possa apresentar deformações após alguns ensaios realizados.

3.2.3 Fases do ensaio

O ensaio de estanquidade divide-se em 6 fases:

- Pré-enchimento
- Enchimento
- Estabilização
- Equalização
- Teste ou Medição
- Esvaziamento e marcação da peça

Na fase de pré-enchimento, as válvulas de enchimento e de abertura para esvaziamento (vácuo) comutam e efetua-se um enchimento inicial até uma pressão inferior à requerida para permitir um enchimento rápido sem o perigo de ultrapassar a pressão de ensaio. Na fase de enchimento, continua-se o enchimento até à pressão requerida. No final desta fase, a pressão de ensaio é controlada pelo sensor piezoelétrico. Na fase de estabilização, a válvula de enchimento fecha-se e as duas peças são completamente isoladas do circuito de alimentação de ar e ficam sob a pressão de ensaio. Na fase de equalização, devido à válvula de equalização há um equilíbrio em termos de pressão entre as duas peças. Na fase de teste, a válvula de equalização fecha-se e as peças de teste e referência ficam completamente isoladas uma da outra. Um sensor de pressão diferencial mede a diferença de pressão entre as peças. Na fase de esvaziamento, as válvulas de abertura para esvaziamento (vácuo) e equalização abrem-se, voltando as peças à pressão atmosférica. Nesta última fase, caso o resultado seja conforme, é também feita uma marcação na peça através de uma ponta metálica presente na ferramenta usada no ensaio.

Na figura 14 está representada a esquematização do mecanismo de funcionamento do ensaio acima explicado.

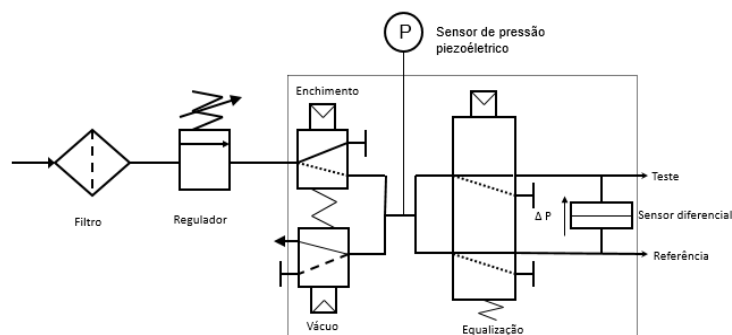


Figura 14 - Princípio de funcionamento do ensaio

3.2.4 Procedimentos de ensaio na linha de produção

Após uma troca de referência ou início de turno, o operador tem de verificar se os parâmetros do ensaio de estanquidade, definidos pelo fornecedor do aparelho de medição, estão corretamente inseridos no Fugómetro. Para efetuar tal verificação, o operador dispõe de uma instrução de controlo, apresentada no Anexo F.

Posteriormente, para verificar se o Fugómetro está a efetuar corretamente a distinção entre uma peça considerada boa (dentro do limite de especificação) e uma peça considerada má (fora do limite de especificação), o operador mede inicialmente duas peças. A peça pintada a verde é uma peça que está dentro do limite de especificação enquanto a peça pintada a vermelho é uma peça que está fora do limite de especificação, devendo ser rejeitada na medição da variação de pressão. Na figura 15, são apresentadas as peças utilizadas para tal verificação.



Figura 15 - Peças usadas para verificação do Fugómetro

Após as verificações anteriormente referidas, inicia-se o ensaio de estanquidade. Como podemos observar na “Gama de Operação” representada no anexo G, a primeira tarefa do operador é colocar a peça na Ferramenta e, de seguida, acionar o botão “início do ciclo”. No final do ensaio, no caso da peça estar conforme a especificação, o operador verifica se esta tem o ponto de marcação realizado pela ferramenta. No caso da peça não estar conforme, o operador coloca-a na caixa referente ao posto para onde esta peça seguirá. Nesta última situação, o operador dispõe de duas caixas, uma para peças que serão retrabalhadas e outra para as consideradas sucata. No caso das peças retrabalhadas, o operador identifica a peça com um traço pintado a caneta de feltro após a primeira repetição. No caso do resultado da peça for não conforme após a segunda repetição, o operador efetua outro traço. No caso do resultado da peça for não conforme após a terceira repetição, o operador verifica que a peça já tem os dois traços e coloca essa peça na caixa respeitante às peças consideradas sucata.

3.3 1ª Fase da Modelo DMAIC: Definir

Neste subcapítulo, pretende-se definir o propósito e âmbito do projeto e obter informações gerais sobre o processo e consumidores envolvidos.

3.3.1 Constituição da equipa e planeamento das tarefas

Conforme mencionado no Anexo H, foi criada uma equipa de suporte ao projeto, com elementos pertencentes à manutenção, automação, qualidade e metrologia. Nesse documento, foram também especificados pormenores relativos ao projeto, tais como, objetivos, duração entre outros.

Tendo como objetivo a monitorização do progresso do trabalho, foi realizado um diagrama temporal com tarefas a realizar e a respetiva duração. Este diagrama foi dividido nas 5 fases do modelo, atribuindo a cada fase as tarefas com maior importância. O referido anteriormente pode ser visualizado no Anexo A.

3.3.2 Descrição do Problema

A qualidade de produção de tubos EGR é validada com um ensaio de estanquidade antes do envio ao cliente. Atualmente esse processo não tem o nível de otimização desejado, sendo necessário melhorar o tempo de ciclo do ensaio e a percentagem de retrabalho referente aos reensaio. Este retrabalho é quantificado pela repetição do ensaio para uma dada peça, visto esta ter apresentado um resultado não conforme no primeiro ensaio, mas próximo o suficiente da especificação do cliente para que o segundo ensaio seja realizado. Parte deste reensaio pode ser evitável dado ter sido um erro de leitura, ou seja, a peça está em conformidade, enquanto outra parte não pode, dado que a leitura é a correta e a peça apresenta uma não-conformidade.

Do ponto de vista da parametrização das fases deste processo, no início do projeto esta era feita de forma empírica pelo fornecedor do dispositivo de medição. Esta definição era realizada com base na sua experiência e em testes “tentativa erro” até conseguir uma parametrização que conseguisse efetuar medições com os resultados esperados. Esta parametrização consistia nos tempos de cada fase e no intervalo de especificação que se pretendia fazer o ensaio. Como na empresa não existia conhecimento suficiente acerca do Fugómetro e acerca do ensaio de estanquidade, a parametrização era assim definida, não sendo possível saber se as medições estavam a ser corretamente efetuadas e, consequentemente, se estavam a ser entregues peças boas ou más ao cliente, mesmo sendo consideradas boas pelo ensaio.

Duas medições consecutivas realizadas na linha de produção à mesma peça e com diferentes tempos para cada fase, resultaram em valores de fuga diferentes, conforme se pode verificar pelos valores da tabela 2. Estes valores apresentados são a média de 5 medições. Com um menor tempo de ciclo, obteve-se um maior valor de fuga. Como tal, é necessário obter um modelo que otimize o compromisso entre tempo de ciclo, percentagem de retrabalho e valor de fuga estável.

Tabela 2 - Valor de Fuga correspondente a duas experiências

Fases	Medição 1	Medição 2
Pré-enchimento	0s	1.5s
Enchimento	3s	3s
Estabilização	17s	10s
Equalização	4s	0.5s
Medição	10s	4s
Esvaziamento e marcação da peça	0,1s	0,1s
Tempo de ciclo	34,1 s	19,1s
Valor de Fuga	2 Pa/s	6 Pa/s

Outro aspeto importante a considerar no ensaio de estanquidade são os fatores que possam contribuir para a variabilidade do processo. Até ao início do projeto, apenas existia documentação de alguns fatores que pudessem afetar a variabilidade, tais como os respeitantes às características do aparelho de medição e da peça, à colocação da peça pelo operador, às características ambientais, à parametrização do processo e às características dos restantes elementos presentes (tipo de junta, por exemplo).

Para minimizar a variabilidade do processo, será fundamental identificar e posteriormente quantificar a variabilidade dos fatores que tenham um impacto significativo no processo para que se possam tomar medidas de prevenção.

3.3.3 Identificação do consumidor

No desenvolvimento deste projeto Seis Sigma, o consumidor em questão será a “BorgWarner Viana do Castelo”, visto que o trabalho realizado tem o seu principal foco num processo da fábrica em questão.

Do ponto de vista da empresa, é fundamental que as peças estejam dentro das especificações requeridas e que as entregas aos clientes sejam entregues dentro do prazo definido. Caso contrário, em termos de qualidade irá haver peças fora da especificação, aumento das percentagens de sucata e retrabalho, em termos de entrega irá haver falhas na entrega das peças e em termos de custos irá haver custos acrescidos devidos à sucata, retrabalho e transportes especiais de certas peças (figura 16).

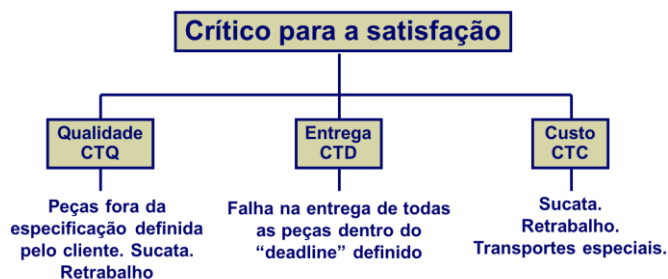


Figura 16 - Árvore "Critical to" do ponto de vista da fábrica

3.3.4 Âmbito do projeto

Neste contexto, tal como a figura 17 mostra, o âmbito do projeto estará focado no controlo de fuga, ou seja, nos ensaios de estanquidade. Este é dos últimos processos que se realiza na fábrica antes dos componentes seguirem para o cliente. Como tal, a variável dependente em estudo será a variação de pressão. Além da variável anteriormente referida, também se irá considerar a percentagem de retrabalho referente ao reensaio como uma variável dependente, no qual o trabalho realizado irá procurar reduzi-la na linha de produção estudada.

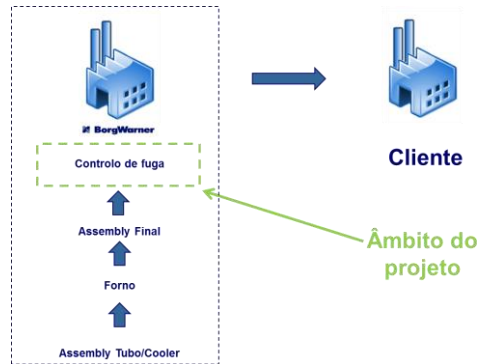


Figura 17 - Visão geral do âmbito do projeto no contexto processual da empresa

No que diz respeito ao ensaio de estanquidade, pretender-se-á registar todas as variáveis que poderão ter influência na variabilidade do processo. Este registo será feito com o apoio da equipa formada e de outras pessoas que tenham experiência no ensaio em questão. Após essa identificação, estudar-se-á a influência da maioria das variáveis, sendo escolhidas pela equipa as que se pretenderão estudar. Haverá algumas variáveis em que o estudo da sua influência dependeria do uso de diferentes peças e Fugómetros e, como tal, essas não serão abordadas neste projeto.

Antes do anteriormente referido, será efetuado um estudo relativo às parametrizações das fases constituintes do ensaio de estanquidade. Este estudo servirá para definir as parametrizações usadas ao longo do projeto assim como definir limites mínimos de tempo de cada fase tendo em conta que se pretende um valor de fuga estável.

Após a quantificação da variabilidade associada a este processo, pretender-se-á reduzi-la na linha de produção em questão, aplicando melhorias que vão de encontro a esse objetivo. Dado o tempo de ciclo disponível da linha de produção, também serão feitas modificações nas parametrizações do ensaio de estanquidade tendo sempre em conta o compromisso de obter uma percentagem de retrabalho referente ao reensaio baixa e um valor de fuga estável.

4 Apresentação com algum detalhe da solução proposta

Para o desenvolvimento das fases apresentadas neste capítulo, a maioria das experiências foram realizadas no laboratório de metrologia. Esta escolha deveu-se ao facto de ser um espaço caracterizado pelo seu ambiente controlado, sendo possível realizar experiências com a menor variabilidade possível. Por exemplo, fatores como a temperatura ambiente e humidade são possíveis de regular, fatores estes não controlados no “shop floor”.

Com o objetivo de comparar as experiências, aplicar melhorias e extrair conclusões foram também realizadas experiências no “shop floor”. É de extrema importância verificar se o trabalho desenvolvido tem os efeitos esperados na produção diária.

Na figura 18, é apresentado um “layout” das instalações da empresa onde se assinala a localização do laboratório de metrologia (assinalado a vermelho) e o local, no “shop floor”, onde foram realizadas as experiências (assinalado a verde).

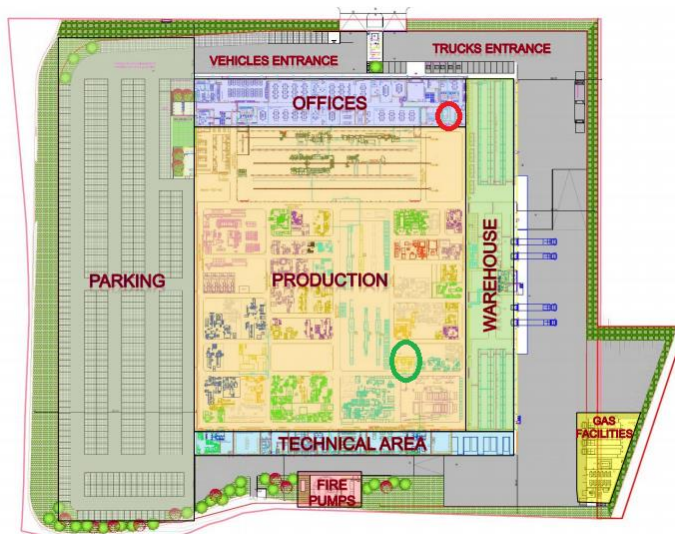


Figura 18 - Layout das instalações da empresa

4.1 Testes realizados às parametrizações do ensaio

Apesar destes testes estarem enquadrados na fase “Analisar” do modelo adotado, foi decidido executar este estudo primeiramente, dado que os seus resultados iriam influenciar a escolha das parametrizações das fases do ensaio a usar durante as experiências.

Deste modo, foram realizados estudos com o objetivo de especificar limites para cada especificação. É ainda de referir que os estudos foram obtidos usando a ferramenta com peça de referência.

No que diz respeito ao tempo de enchimento, deve-se ter em consideração que o tempo não deve ser muito longo para que o tempo de ciclo seja reduzido, mas também não muito curto,

garantindo que a pressão interna é a requerida. Na figura 19 observa-se um ciclo do ensaio de estanquidade, com as parametrizações usadas na linha de produção, onde é possível observar a evolução da pressão interna no decorrer do tempo. Através desta figura, concluiu-se que o tempo de enchimento não deve ser inferior a 2,8 segundos dadas as considerações a ter em conta.

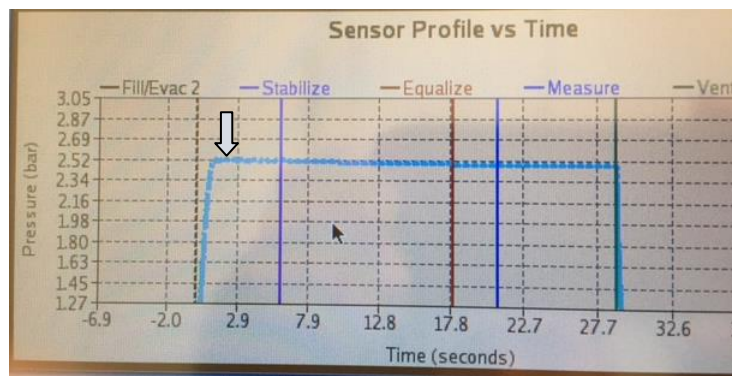


Figura 19 - Parametrização do tempo de enchimento

No que diz respeito ao tempo de estabilização, efetuaram-se medições com parametrização do tempo de enchimento e equalização constantes de 3 e 4 segundos respetivamente. O tempo de estabilização fez-se variar nos seguintes valores: 4;6;8;10;15;20;30 e 40 segundos. Para cada um destes valores de estabilização fez-se medições com três tempos de medição diferentes (4s;10s;15s). Para cada combinação resultante efetuaram-se 10 medições e calculou-se a média, sendo este valor usado na construção do gráfico. Os valores resultantes estão representados na figura 20. Foi possível verificar que para tempos de estabilização superiores a 10 segundos, a variação de pressão tende a estabilizar e a diferença entre as medições com diferentes tempos de medição, dado um tempo de estabilização, tende a ser menor comparativamente a tempos de estabilização inferiores a 10 segundos. Em futuras experiências deve-se tomar em consideração que o tempo de estabilização não deve ser inferior a 10 segundos.

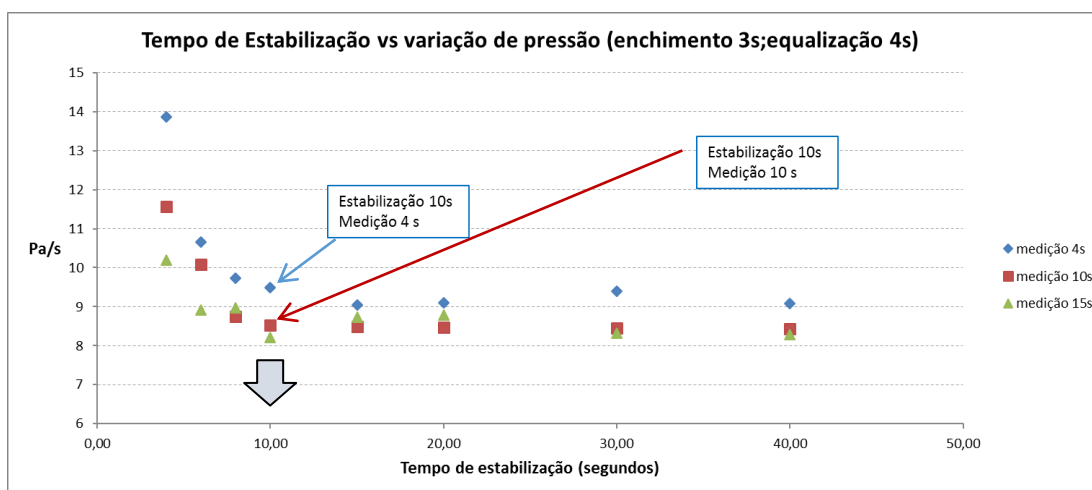


Figura 20 – Efeito do tempo de estabilização na variação de pressão

Relativamente ao tempo de equalização, efetuaram-se medições com parametrização do tempo de enchimento e estabilização constantes de 3 e 15 segundos respetivamente. O tempo de equalização fez-se variar nos seguintes valores: 0,5;1;2;3;4;5;8 e 10 segundos. Para cada um destes valores de equalização fez-se medições com três tempos de medição diferentes (4s;10s;15s). Para cada combinação resultante efetuaram-se 10 medições e calculou-se a média, sendo este valor usado na construção do gráfico. Os valores resultantes estão representados na figura 21. Verificou-se que para tempos de equalização superiores a 4

segundos, a variação de pressão tende a estabilizar e a diferença entre as medições com diferentes tempos de medição, dado um tempo de equalização, tende a ser menor comparativamente a tempos de equalização inferiores a 4 segundos. Em futuras experiências deve-se tomar em consideração que o tempo de equalização não deve ser inferior a 4 segundos.

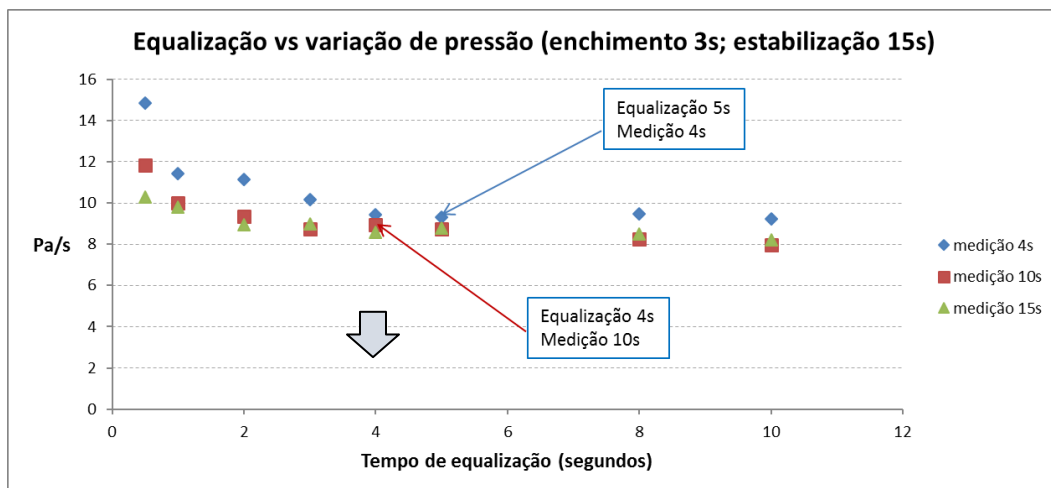


Figura 21 – Efeito do tempo de equalização na variação de pressão

Após os estudos anteriormente apresentados, decidiu-se que a parametrização de cada fase a usar em todos os ensaios a realizar durante o projeto seria a seguinte:

- Fase de Pré-enchimento: 0 segundos;
- Fase de Enchimento: 3 segundos;
- Fase de Estabilização: 17 segundos;
- Fase de Equalização: 6 segundos;
- Fase de Teste ou Medição: 15 segundos;
- Fase de Esvaziamento e marcação da peça: 0,1 segundos.

A decisão desta parametrização apenas teve em conta a estabilização da variação de pressão e um menor valor medido de fuga. Constatou-se tanto na figura 20 e 21 que para tempos de medição de 10 ou 15 segundos as diferenças no valor de fuga, para tempos de estabilização e equalização dentro do limite especificado anteriormente, não eram muito significativas. Como tal, escolheu-se a parametrização de 15 segundos.

4.2 2º Fase do Modelo DMAIC: Medir

Neste subcapítulo serão apresentadas as validações do sistema de medição realizadas referentes a esta fase do modelo. Nesta fase também é expectável realizar uma medição do desempenho atual do processo. Contudo, isso já foi apresentado no subcapítulo 3.1.2 e, como tal, não irá constar neste subcapítulo.

4.2.1 Validação do Sistema de medição

Validação da Ferramenta com peça de referência

Primeiramente sujeitaram-se 21 peças ao ensaio de estanquidade para escolher 10 peças que abrangessem a maior gama de valor de “output”, ou seja, que apresentassem diferentes valores de fuga e se possível os mais distantes entre si. Com esta escolha, obteve-se uma

amostra representativa da variação do valor de fuga da peça em questão. Depois de escolhidas, cada um dos três operadores mediu a mesma peça três vezes. A sequência das peças a medir por cada operador foi gerada de forma aleatória pelo Minitab.

Após as 90 medições, efetuou-se o tratamento de dados e obteve-se os resultados apresentados na figura I1 e I2 do anexo I. É de referir que a temperatura e a percentagem de humidade no laboratório eram de 21,0°C e 50,5%, respetivamente.

Do ponto de vista da estabilidade, podemos verificar através do gráfico “R chart by Operators” da figura I1 do anexo I que, à exceção de uma medição, todos os restantes pontos estão dentro dos limites de controlo.

No que diz respeito à resolução, considera-se que um sistema de medição tem uma boa resolução se for possível verificar, pelo menos, 5 níveis de possíveis valores (incluindo o zero). Na figura I2 do anexo I, verificou-se que se podem distinguir 61 níveis de valores (“Number of Distinct Categories”) e, desta forma, conclui-se que o sistema de medição tem uma boa resolução.

Com base na tabela da figura I2 do anexo I e no gráfico “Components of Variation” da figura I1 do anexo I, verificou-se que a maior fonte de variação advém das diferentes peças (“Part-to-Part”), com uma contribuição de 99.95%. Os restantes 0.05% advém da repetibilidade das medições efetuadas.

No que diz respeito ao desvio e à linearidade, estas características são verificadas na calibração dos equipamentos. Como a periodicidade de calibração está em dia, estas características estão formalmente asseguradas.

A reprodutibilidade está evidenciada no gráfico “X-bar Chart By Operators” da figura I1 do anexo I. Para cada operador, é registado o valor médio obtido nas medições de cada peça. Como os operadores medem as mesmas peças, é esperado que os resultados ou o padrão obtido seja semelhante em todos os operadores. Se houver um maior número de pontos fora de controlo neste gráfico, constata-se que a variação entre medições da mesma peça é menor que a variação entre medições de diferentes peças. Idealmente, o sistema de medição deve ser capaz de detetar a variação entre peças, logo pontos fora de controlo neste gráfico são desejáveis. Assim, conclui-se que a variação na medição é muito menor que a variação devido às peças.

Como o plano de amostragem entre os operadores e as peças é cruzado, há uma potencial interação entre operador e peça. Como podemos verificar no gráfico “Parts * Operators Interaction”, as três linhas sobrepõem-se e, como tal, concluiu-se que os três operadores medem do mesmo modo todas as peças.

Por fim, dada as percentagens obtidas de contribuição e precisão para a variação total, concluiu-se que o sistema de medição é excelente. É de notar que não há dados referentes à precisão para a tolerância, visto que na especificação dos limites de especificação apenas se definiu o limite superior como sendo de 10 Pa/S. Não se definiu o limite inferior como sendo 0 Pa/S visto que podem ocorrer valores negativos devido às diferenças de temperatura entre a temperatura da peça de teste no início e fim do ensaio e a temperatura ambiente.

Validação da Ferramenta sem peça de referência

Nesta validação, usou-se as mesmas 10 peças da validação da Ferramenta com peça de referência. Os resultados obtidos são apresentados na figura J1 e J2 do anexo J. É de referir que a temperatura e a percentagem de humidade no laboratório eram de 20,5°C e 46,0%, respetivamente.

Do ponto de vista da estabilidade, podemos verificar através do gráfico “R chart by Operators” da figura J1 do anexo J que, à exceção de uma medição, todos os restantes pontos estão dentro dos limites de controlo.

No que diz respeito à resolução, considera-se que um sistema de medição tem uma boa resolução se for possível verificar, pelo menos, 5 níveis de valores (incluindo o zero). Na figura J2 do anexo J, verificou-se que se podem distinguir 56 níveis de valores (“Number of Distinct Categories”) e, desta forma, concluiu-se que o sistema de medição tem uma boa resolução.

Pela tabela apresentada na figura J2 do anexo J e pelo gráfico “Components of Variation” da figura J1 do anexo J, verificou-se que a maior fonte de variação advém das diferentes peças (“Part-to-Part”), com uma contribuição de 99.94%. Os restantes 0.06% advém na mesma proporção da reprodutibilidade e repetibilidade nas medições efetuadas.

No que diz respeito ao desvio e à linearidade, estas características estão asseguradas pela mesma razão anteriormente referida.

A reprodutibilidade está evidenciada no gráfico “X-bar Chart By Operators” da figura J1 do anexo J. Como todos os pontos estão fora dos limites de controlo, o sistema de medição é capaz de detetar a variação entre peças. Também se concluiu que a variação na medição é muito menor que a variação devido às peças.

Pelas mesmas razões apresentadas na validação da ferramenta com peça de referência, concluiu-se que os três operadores medem do mesmo modo todas as peças.

Por fim, dada as percentagens obtidas de contribuição e precisão para a variação total, concluiu-se que o sistema de medição é excelente. É de notar que não há dados referentes à precisão para a tolerância, pelas mesmas razões anteriormente referidas na validação da ferramenta com peça de referência.

Validação da Ferramenta sem peça de referência na linha de produção

Após as validações efetuadas às duas Ferramentas no laboratório de metrologia, efetuou-se uma validação da Ferramenta sem peça de referência na linha de produção para comprovar se os resultados obtidos nas anteriores validações se confirmavam igualmente no “shop floor”. Estes resultados são apresentados na figura K1 e K2 do anexo K. A temperatura no “shop floor” era de 22°C.

Do ponto de vista da estabilidade, podemos verificar através do gráfico “R chart by Operators” da figura K1 do anexo K que todos os pontos estão dentro dos limites de controlo. Desta forma, concluiu-se que não há causas especiais de variação e, como tal, o sistema de medição está em controlo estatístico.

No que diz respeito à resolução, considera-se que um sistema de medição tem uma boa resolução se for possível verificar, pelo menos, 5 níveis de valores (incluindo o zero). Na figura K2 do anexo K, verificou-se que se podem distinguir 111 níveis de valores (“Number of Distinct Categories”) e, desta forma, concluiu-se que o sistema de medição tem uma boa resolução.

Pela tabela apresentada na figura K2 do anexo K e pelo gráfico “Components of Variation” da figura K1 do anexo K, verificou-se que a maior fonte de variação advém das diferentes peças (“Part-to-Part”), com uma contribuição de 99.98%. Os restantes 0.02% advém na mesma proporção da reprodutibilidade e repetibilidade nas medições efetuadas.

No que diz respeito ao desvio e à linearidade, estas características estão asseguradas pela mesma razão anteriormente referida.

A reprodutibilidade está evidenciada no gráfico “X-bar Chart By Operators” da figura K1 do anexo K. Como todos os pontos estão fora dos limites de controlo, o sistema de medição é capaz de detetar a variação entre peças. Também se concluiu que a variação na medição é muito menor que a variação devido às peças.

Pelas mesmas razões apresentadas na validação da ferramenta com peça de referência, concluiu-se que os três operadores medem do mesmo modo todas as peças.

Por fim, dada as percentagens obtidas de contribuição e precisão para a variação total, concluiu-se que o sistema de medição é excelente. É de notar que não há dados referentes à precisão para a tolerância, pelas mesmas razões anteriormente referidas na validação da ferramenta com peça de referência.

Após as três validações anteriormente apresentadas, atingiu-se o primeiro objetivo definido no início do projeto. Concluiu-se que o sistema de medição usado é fiável e, como tal, não é considerada uma fonte de variabilidade significativa do processo. Deste modo, é possível focar o estudo noutras fontes de variabilidade, sabendo que a variabilidade proveniente do sistema de medição é muito reduzida relativamente à variabilidade do processo e do produto. Com os resultados obtidos, não é necessário fazer qualquer tipo de intervenção no sistema de medição visto que este claramente é capaz de distinguir peças dentro e fora dos limites de especificação requeridos.

4.3 3ª Fase do Modelo DMAIC: Analisar

Neste subcapítulo será apresentado, inicialmente, um levantamento dos potenciais fatores com influência na variabilidade do processo em estudo. De seguida, será realizada a análise da influência da maioria dos fatores na variável dependente em questão

4.3.1 Apresentação dos potenciais inputs

Até à data de início da realização do projeto, apenas havia registo de alguns fatores como potenciais variáveis com influência no valor medido no ensaio de estanquidade. Juntamente com a equipa procedeu-se à elaboração de uma lista de inputs do processo e, de seguida, construiu-se o diagrama representado na figura 22. Ao longo do projeto, esse diagrama sofreu alterações.

No diagrama causa efeito, os potenciais fatores foram agrupados em 6 categorias:

- Medição – fatores relativos ao equipamento de medição;
- Material – fatores relativos às características da peça sujeita ao ensaio de estanquidade;
- Método – fatores relativos às especificações do ensaio de estanquidade;
- Dispositivo – fatores relativos às possíveis ferramentas a usar e respetivas características para executar o ensaio;
- Mão de obra – fatores relativos ao operador que executa o ensaio;
- Meio ambiente – fatores relativos aos aspetos ambientais da fábrica.

Nos subcapítulos seguintes, serão apresentados os testes realizados às variáveis que se pretenderam estudar.

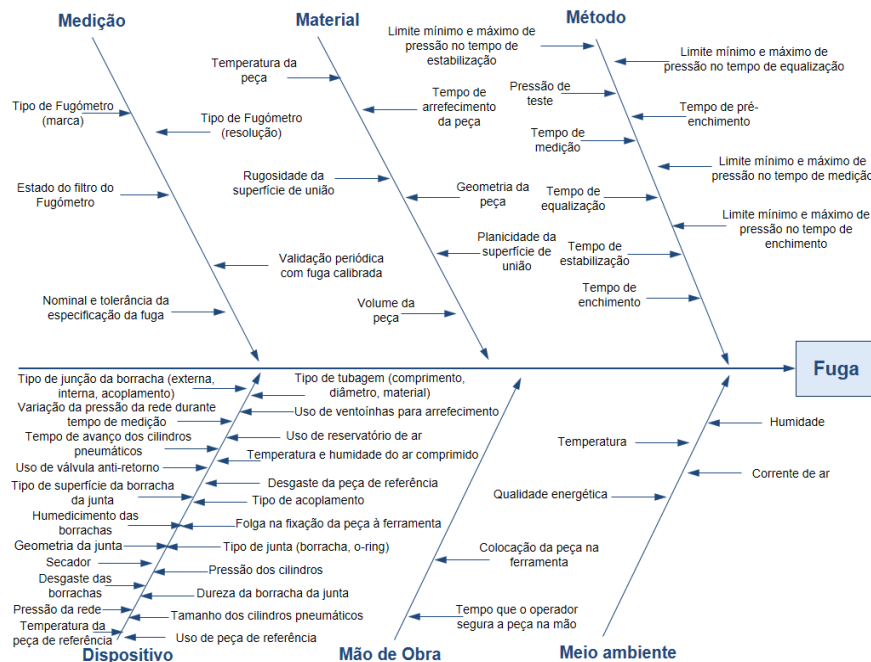


Figura 22 - Diagrama causa efeito

4.3.2 Teste de Hipóteses realizados às ferramentas utilizadas

Teste de Hipóteses realizado à média das medições realizadas com ou sem peça de referência

Com as 10 peças anteriormente usadas e usando os valores registados nas validações da ferramenta com peça de referência e da sem peça de referência no laboratório, efetuou-se um Teste de Hipóteses para averiguar se havia diferenças significativas entre as duas ferramentas no que diz respeito à média dos valores medidos. Para cada peça, calculou-se a média das 9 medições e usou-se o teste “Paired t-test”. Foi escolhido este estudo por se tratar de uma comparação de médias entre 2 amostras, sendo estas dependentes pois as peças medidas com as 2 ferramentas são as mesmas.

Refere-se, ainda, que se especificou um nível de significância de 5%. As hipóteses usadas para o estudo foram as seguintes:

- H_0 – A média dos valores medidos nas duas ferramentas é igual;
- H_1 – A média dos valores medidos nas duas ferramentas é diferente.

Obteve-se um P-value de 0,03, logo há evidência estatística que a média dos valores medidos é diferente com as duas ferramentas. Como podemos observar na figura L1 do anexo L, a diferença entre a média dos valores medidos com a ferramenta com peça de referência e com a ferramenta sem peça de referência é de cerca de 2,07 Pa/s, sendo medidos valores mais elevados com a ferramenta com peça de referência.

Contudo, na figura L2 do anexo L observou-se que essa diferença no valor medido apenas é observada para peças com valor de fuga entre 50 e 150 Pa/s. Tendo em conta que o limite de especificação é 10 Pa/s, as peças medidas que se encontram nesse limite não apresentam diferenças significativas no valor medido usando as duas ferramentas. Deste modo, em termos de média do valor medido, não há diferenças em usar as duas ferramentas para submeter peças ao ensaio de estanquidade na linha de produção.

Teste de Hipóteses realizado ao desvio padrão das medições realizadas com ou sem peça de referência

Para cada peça, calculou-se o desvio padrão das 9 medições e usou-se o teste “2-Sample Standard Deviation”. Foi escolhido este estudo por se tratar de uma comparação de desvio padrão entre 2 amostras.

Refere-se, ainda, que se especificou um nível de significância de 5%. As hipóteses usadas para o estudo foram as seguintes:

- H_0 – O desvio padrão dos valores medidos nas duas ferramentas é igual;
- H_1 – O desvio padrão dos valores medidos nas duas ferramentas é diferente.

Obteve-se um P-value de 0,002 e, como tal, há evidência estatística que o desvio padrão dos valores medidos é diferente com as duas ferramentas. Como podemos observar na figura M1 do anexo M, o desvio padrão com ferramenta com peça de referência é de 0,53 Pa/s, enquanto o desvio padrão com ferramenta sem peça de referência é de 1,1 Pa/s.

Na figura M2 do anexo M, comparando os dois gráficos constatou-se que, à exceção do valor das duas últimas peças, o desvio padrão é consideravelmente mais elevado na ferramenta sem peça de referência. Pelas medições efetuadas do valor de fuga, as únicas peças que se encontram dentro dos limites de especificação são as duas primeiras. Para a ferramenta com peça de referência, o desvio padrão é de 0,86 Pa/s e 0,47 Pa/s enquanto que para a ferramenta sem peça de referência é de 1,74 Pa/s e 1,38 Pa/s. Deste modo, em termos de desvio padrão do valor medido, deve ser usada a ferramenta com peça de referência.

Após os dois testes de hipóteses realizados, considerando os resultados obtidos concluiu-se que o uso da ferramenta com peça de referência é o mais aconselhável. Para o limite de especificação em questão, as peças medidas com a ferramenta com peça de referência apresentam um valor médio semelhante à ferramenta sem peça de referência, mas uma menor variabilidade em medições consecutivas. Com o estudo do desvio padrão, constatou-se que o retrabalho efetuado logo após a medição principal pode ser evitado se o valor de “output” obtido não for perto o suficiente do limite de especificação. Como o desvio padrão variou entre cerca de 0,40 Pa/s e de 0,90 Pa/s, peças com valores obtidos que distem mais de 1,0 Pa/s da especificação não devem ser sujeitas ao ensaio de estanquidade logo após a primeira medição. Neste caso, devem ser encaminhadas novamente para o forno.

4.3.3 Desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo

Perante a lista de potenciais inputs anteriormente apresentada, foi decidido, juntamente com a equipa, que se iria realizar um primeiro desenho de experiências (DOE) para estudar a influência individual ou combinada de fatores pertencentes à categoria dispositivo. Realizou-se um desenho de experiência do tipo “Two-level fractional factorial” e, como tal, para cada fator definiu-se dois níveis, ou seja, dois valores diferentes de parametrização. Os fatores e os respetivos níveis são:

- Pressão dos cilindros: 4 bar / 5 bar
- Pressão da rede: 5 bar / 6 bar
- Reservatório de ar, colocado entre a rede de ar comprimido e a entrada do Fugómetro: com / sem
- Válvula anti-retorno, colocada nos cilindros pneumáticos: com / sem

- Variação da pressão da rede durante o tempo de medição: -0,5 bar / 0 bar
- Dureza do o-ring que faz a vedação entre o cilindro pneumático e a peça em teste: Standard / 26 shore

Das 10 peças utilizadas para as validações anteriormente apresentadas, utilizou-se neste DOE a peça que estava mais próxima do limite de especificação. Decidiu-se apenas fazer uma réplica de cada combinação e efetuar três medições para cada uma delas. Com os valores obtidos, calculou-se o desvio padrão e a média associada a cada combinação. Dado que são 6 fatores, realizaram-se 16 experiências, o que corresponde a uma resolução de IV. Na análise de variância utilizada no modelo, especificou-se um nível de significância de 10% dado que o desenho de experiências é do tipo fracional e apenas pretende identificar os fatores vitais. O risco de se determinar que um fator tem influência quando de facto não o tem, tem de ser maior neste tipo de desenho de experiências uma vez que não se efetua todas as combinações de fatores e níveis.

A pressão dos cilindros e da rede foi controlada através de manómetros, que permitiram regulá-las nos valores desejados. A variação da pressão da rede durante o tempo de medição foi feita no respetivo manómetro. Tendo em conta as conclusões obtidas nos testes de hipóteses anteriormente apresentados, foi utilizada a ferramenta com peça de referência para realizar as experiências. O anexo N, mostra a montagem dos manómetros, do reservatório e da válvula anti-retorno para realização das experiências.

Após se efetuarem as medições, procedeu-se ao tratamento dos dados e efetuou-se um estudo relativo à média e outro relativo ao desvio padrão dos valores medidos. No anexo O, são descritas as etapas de redução do modelo dos dois estudos e é feita uma análise aos gráficos respeitantes aos resíduos, de forma a garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas.

No que diz respeito ao valor médio, obteve-se um modelo, expresso na figura O10 do anexo O, que explica cerca de 75,35% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que o reservatório de ar, a variação da pressão da rede durante o tempo de medição e a interação entre a pressão da rede e a pressão dos cilindros tinham influência significativa no valor medido (figura O9 do anexo O). Constatou-se que a presença do reservatório de ar não é favorável. Também se concluiu que se não existir qualquer variação da pressão da rede durante o tempo de medição, o valor médio medido é inferior. Quanto à interação entre a pressão dos cilindros e a pressão da rede, verificou-se que o valor médio medido é menor quando a pressão dos cilindros é de 5 bar e quando a pressão da rede é de 6 bar.

Relativamente ao desvio padrão, obteve-se um modelo, expresso na figura O18 do anexo O, que explica cerca de 77,60% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que a variação da pressão da rede durante o tempo de medição e a interação dupla entre a pressão da rede e o-ring têm influência no desvio padrão dos valores medidos (figura O17 do anexo O). Tal como no valor médio, se não existir variação da pressão da rede durante o tempo de medição a variabilidade das medições será menor. Quanto à interação entre a pressão da rede e o o-ring, verificou-se que a variabilidade é menor quando a pressão da rede está a 6 bar e o o-ring é o standard.

Após este desenho de experiências, os resultados obtidos mostraram que é necessário possuir uma rede de ar comprimido que não sofra oscilações, para que variações da pressão da rede durante a realização dos ensaios de estanquidade possam ser evitadas. Atualmente, as novas linhas de produção já possuem redes de ar comprimido independentes para cada aparelho de medição, pois redes de ar comprimido partilhadas por dois dispositivos são mais suscetíveis a variações de pressões. A linha de produção em estudo possui rede de ar partilhada e utiliza o reservatório de ar. Na fábrica, a maioria das linhas de produção não possui rede de ar partilhada e não utiliza o reservatório de ar. No que diz respeito às pressões da rede e dos

cilindros, ambas são de 6 bar. Quanto ao o-ring, está a ser usado o considerado como standard no DOE.

4.3.4 Desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material

Foi decidido, juntamente com a equipa, que se iria realizar um desenho de experiências (DOE) para estudar a influência individual ou combinada de fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material. Realizou-se um desenho de experiência do tipo “Two-level full-and high-resolution”, tendo-se definido para cada fator dois níveis. Os fatores e os respetivos níveis são:

- Temperatura da peça: 16°C / 30°C
- Temperatura ambiente: 18,5°C / 27°C
- Humidade: 40% / 60%
- Corrente de ar: com / sem

A peça utilizada na realização deste desenho de experiências foi a mesma utilizada no anterior DOE. Decidiu-se fazer apenas uma réplica de cada combinação e efetuar quatro medições para cada uma delas. Com os valores obtidos, calculou-se o desvio padrão e a média associada a cada combinação. Dado que são 4 fatores, realizaram-se 16 experiências, o que corresponde a uma resolução Full. Especificou-se um nível de significância de 5% dado que o desenho de experiências é do tipo “Two-level full-and high-resolution”. Neste caso, o risco de se determinar que um fator tem influência quando de facto não o tem, tem de ser menor visto que se pretende identificar os fatores vitais e as interações entre esses.

A corrente de ar foi simulada com uma ventoinha, tendo em atenção que o local onde se situava e a intensidade usada fossem sempre a mesma durante todas as experiências. A temperatura ambiente e a humidade foram configuradas através de um dispositivo, presente no laboratório, que regula esses dois parâmetros. Para confirmar que esta configuração estava correta, utilizou-se termómetros para registar esses parâmetros. Para atingir os dois níveis da temperatura da peça, utilizou-se um frigorífico do armazém dos químicos para o nível mais baixo e uma estufa, à temperatura de 100°C, para o nível mais elevado. Para verificar esta temperatura utilizou-se um sensor de contato ligado a um multímetro. No anexo P, são apresentadas duas fotografias deste desenho de experiências.

Definiu-se que a pressão da rede e a pressão dos cilindros seria de 6 e 5 bar, respetivamente, e o o-ring usado seria o standard. Também se decidiu que não se iria utilizar o reservatório de ar e a válvula anti-retorno e que a variação de pressão da rede durante o tempo de medição não iria sofrer alterações. Foi utilizada a ferramenta com peça de referência para realizar as experiências.

Após se efetuarem as medições, procedeu-se ao tratamento dos dados e efetuou-se um estudo relativo à média e outro relativo ao desvio padrão dos valores medidos. No anexo Q, são descritas as etapas de redução do modelo dos dois estudos e é feita uma análise aos gráficos respeitantes aos resíduos, de forma a garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas.

No que diz respeito ao valor médio, obteve-se um modelo, expresso na figura Q5 do anexo Q, que explica cerca de 99,97% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que a temperatura da peça, a temperatura ambiente, a interação dupla entre temperatura peça e corrente de ar, entre outras, têm influência no valor médio medido (figura Q4 do anexo Q). A temperatura da peça tem uma contribuição de 69% na variabilidade do modelo, enquanto a temperatura ambiente tem uma contribuição de 15%. Apesar de haver mais termos com

influência no valor médio medido, estes são claramente os mais influentes. Constatou-se que à medida que a temperatura da peça aumenta, o valor médio medido também aumenta e à medida que a temperatura ambiente aumenta, o valor médio medido diminui.

Quanto ao desvio padrão, obteve-se um modelo, expresso na figura Q16 do anexo Q, que explica cerca de 83,95% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que a interação tripla entre temperatura peça, temperatura ambiente e corrente de ar tem influência no desvio padrão dos valores medidos (figura Q15 do anexo Q).

Após este desenho de experiências, concluiu-se que a temperatura da peça é um fator chave a ser tomado em consideração no estudo do ensaio de estanquidade. Será de evitar a realização do ensaio em que a temperatura das peças não se situe num intervalo de valores a especificar. Deve ser feita uma análise da temperatura ambiente no “shop floor”, em cada turno e ao longo do ano, para averiguar se este fator está controlado ou se é necessário tomar medidas para mantê-lo num intervalo de valores a definir. Quanto à corrente de ar, devem ser estudadas as suas causas nas linhas de produção e, sempre que possível, reduzir a existência desse fator. Por último, a humidade não é um fator relevante e, como tal, não será alvo de estudos adicionais.

Constatou-se através da figura 23 a relação entre a temperatura ambiente e a temperatura da peça, e o respetivo valor de fuga. É necessário dividir por 15 o valor de fuga apresentado na figura para se obter o valor em Pa/s. Constatou-se que dada uma temperatura ambiente, a temperatura da peça apenas poderá ser igual ou inferior 1°C para que as medições do valor de fuga estejam dentro do limite de especificação (representado a verde).

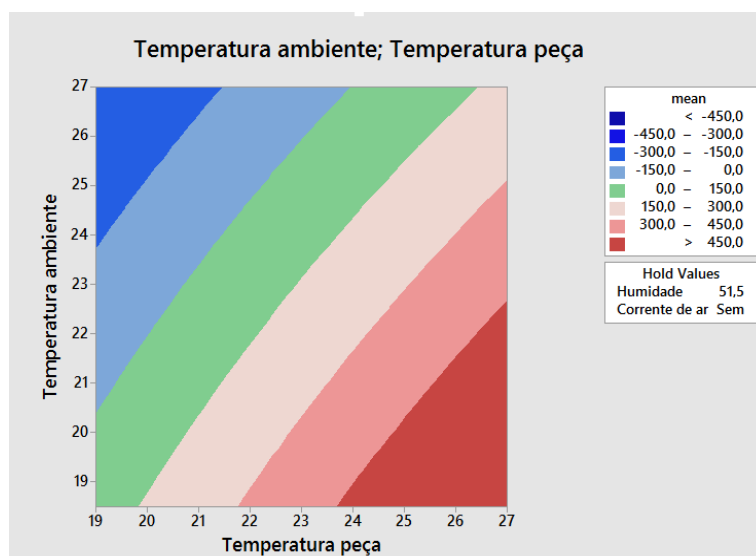


Figura 23 - Relação entre temperatura ambiente, temperatura da peça e valor de fuga

4.3.5 Desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria método

Foi decidido, juntamente com a equipa, que se iria realizar um desenho de experiências (DOE) para estudar a influência individual ou combinada de fatores pertencentes à categoria método. Realizou-se um desenho de experiências do tipo “Two-level full-and high-resolution”, tendo-se definido para cada fator dois níveis. Os fatores e os respetivos níveis são:

- Fase de enchimento: 2,5 / 3,5 segundos;
- Fase de estabilização: 10 / 20 segundos;

- Fase de equalização: 0,5 / 6 segundos;
- Fase de medição: 2 / 10 segundos.

Neste desenho de experiências, a peça utilizada foi a mesma dos anteriores DOE. Decidiu-se fazer apenas uma réplica de cada combinação e efetuar quatro medições para cada uma delas. Com os valores obtidos, calculou-se o desvio padrão e a média associada a cada combinação. Dado que são 4 fatores, realizaram-se 16 experiências, o que corresponde a uma resolução Full. Especificou-se um nível de significância de 5% pela mesma razão mencionada no anterior DOE.

Ao contrário dos desenhos de experiências anteriormente realizados, este foi realizado na linha de produção. A linha usada é uma linha de produção nova e que já tem uma rede de ar não partilhada para cada aparelho de medição. Os Fugómetros existentes nessa linha também não estão equipados com o reservatório de ar. Quanto às temperaturas ambiente e da peça durante as experiências, foram registadas temperaturas de cerca de 24°C. Foi utilizada a ferramenta com peça de referência para realizar as experiências.

Após se efetuarem as medições, procedeu-se ao tratamento dos dados e efetuou-se um estudo relativo à média e outro relativo ao desvio padrão dos valores medidos. No anexo R, são descritas as etapas de redução do modelo dos dois estudos e é feita uma análise aos gráficos respeitantes aos resíduos, de forma a garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas.

No que diz respeito ao valor médio, obteve-se um modelo, expresso na figura R4 do anexo R, que explica cerca de 99,98% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que a fase de estabilização, a fase de equalização, a fase de medição e outras interações duplas têm influência no valor médio medido (figura R3 do anexo R). A fase de estabilização tem uma contribuição de 33% na explicação da variabilidade do modelo, a fase de equalização 29% e a fase de medição 17%. Apesar de haver mais termos com influência no valor médio medido, estes são claramente os mais influentes. Constatou-se que à medida que a parametrização toma valores superiores nas três fases referidas, o valor médio medido é menor.

Quanto ao desvio padrão, obteve-se um modelo, expresso na figura R17 do anexo R, que explica cerca de 78,43% da variabilidade dos valores medidos. Concluiu-se que a fase de equalização e medição têm influência no desvio padrão dos valores medidos (figura R16 do anexo R). À medida que a parametrização toma valores superiores nas duas fases referidas, a variabilidade nas medições é menor.

Após este desenho de experiências, constatou-se que a parametrização das fases constituintes do ensaio de estanquidade tem uma importância relevante quer no valor médio quer na variabilidade das medições. Deste modo, é necessário fazer um levantamento dos tempos de ciclo das etapas constituintes do processo produtivo para verificar se a atual definição das parametrizações se ajusta ao tempo de ciclo disponível. Para efetuar melhorias nas parametrizações será importante ter em conta não só o tempo de ciclo disponível assim como o “takt time” da linha de produção em questão, calculado tendo em conta as previsões dadas pelo cliente.

4.3.6 Estudo do tempo de arrefecimento da peça submetida ao ensaio

Até ao início do projeto, não havia conhecimento acerca do tempo necessário para a temperatura da peça atingir a temperatura ambiente após o final da etapa de brasagem no forno. Após a saída do forno, o carro que armazena as peças segue para um local onde se armazenam temporariamente pequenos lotes de produção. Até à data, não havia nenhum critério para controlar a temperatura da peça antes de esta ser submetida ao ensaio.

Verificou-se que, por vezes, o carro que transporta as peças seguia diretamente do forno para a linha de produção onde se realiza o ensaio de estanquidade, em vez de aguardar no local designado. Neste caso eram usadas ventoinhas para arrefecer a temperatura das peças, mas não havia qualquer critério para definir a partir de qual temperatura se poderia usá-las. Com os resultados obtidos no desenho de experiências relativo às temperaturas, o estudo e a monitorização do progresso da temperatura da peça revelou-se de extrema importância.

A peça está sujeita a 1100° C durante 50 minutos no forno. Após sair do forno, escolheu-se uma peça e mediu-se a temperatura da peça a cada minuto. Foram registadas 52 medições e pode-se constatar pela figura 24 que a temperatura da peça tende a estabilizar após 40 minutos depois de sair do forno. Essa temperatura de estabilização foi de cerca de 23,9°C. Durante os 52 minutos de medição a temperatura ambiente no “shop floor” era de cerca de 23°C.

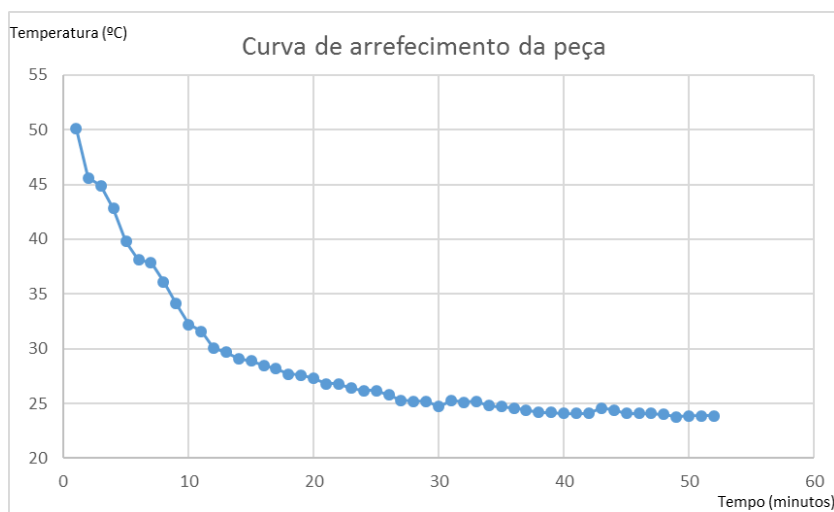


Figura 24 - Curva de arrefecimento da peça

4.3.7 Estudo da temperatura da peça de referência

No seguimento do estudo anteriormente feito relativamente à temperatura da peça, decidiu-se estudar o efeito das medições na temperatura da peça de referência durante algum tempo. Efetuou-se um levantamento da temperatura da peça de referência após cada 5 peças sujeitas ao ensaio de estanquidade. Esta medição de temperatura foi realizada com o dispositivo já usado no desenho de experiências relativo aos fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material. Como a linha de produção em questão dispõe de 2 Fugómetros, decidiu-se registar a temperatura das duas peças de referência, uma dentro e outra fora da câmara, para averiguar se havia diferenças na temperatura da peça. O levantamento referido está representado na figura 25.

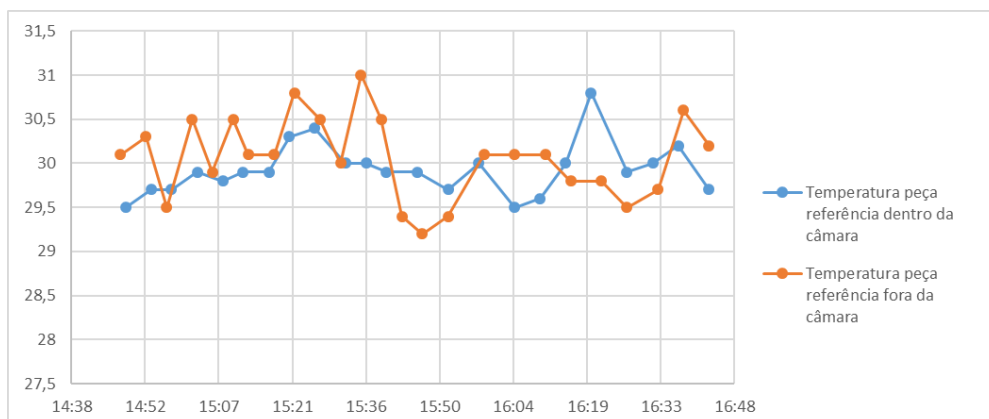


Figura 25- Efeito de medições consecutivas na temperatura da peça de referência dentro e fora da câmara

Para verificar se há diferenças significativas no valor médio medido da temperatura entre os dois casos, realizou-se um teste de hipóteses. Usou-se o teste “2- Sample t-test” uma vez que se trata de comparar médias entre duas amostras independentes.

Especificou-se um nível de significância de 5%. As hipóteses usadas para o estudo foram as seguintes:

- H_0 – A média dos valores medidos nas duas configurações é igual;
- H_1 – A média dos valores medidos nas duas configurações é diferente.

Obteve-se um P-value de 0,208 e, como tal, não há evidência estatística que comprove que o valor médio medido é diferente nas duas configurações da peça de referência. Observou-se na figura S1 do anexo S, que o valor médio medido com a ferramenta fora da câmara de ensaio é de 30,07°C, enquanto o valor médio medido com a ferramenta dentro da câmara de ensaio é de 29,93°C.

Tanto na figura 25 como na figura S2 do anexo S, comparando o registo das temperaturas de cada configuração, constatou-se que há menores oscilações de temperaturas observadas no caso da peça referência dentro da câmara de ensaio. É uma conclusão expectável, visto que a peça de referência fora da câmara está mais suscetível a variações de temperatura devido a correntes de ar provocadas pela movimentação dos operadores e pelas ventoinhas.

Na tabela 3, foi registado o número de peças retrabalhadas devido a fugas nos dois Fugómetros.

Tabela 3 – Registo do número de peças retrabalhadas em cada Fugómetro

Hora	Fugómetro com peça de referência dentro da câmara	Fugómetro com peça de referência fora da câmara
Durante medição das temperaturas (14h – 17h)	16	10
Turno tarde (14h – 22h)	98	81
Turno noite (22h – 06h)	50	120

De acordo com os dados da tabela 3, a diferença entre o número de fugas registadas nos dois casos não foi significativa durante a medição das temperaturas das peças de referência. Após a medição destas, a configuração da peça de referência manteve-se diferente nos dois Fugómetros até ao final do turno da tarde e durante o turno da noite. No turno da tarde, tal como durante a medição das temperaturas, a diferença entre o número de fugas registadas nos dois casos não foi significativa. Em ambos os casos, o número é superior na configuração com a peça de referência dentro da câmara de ensaio. No turno da noite, a diferença entre o número de fugas registadas nos dois casos já foi significativa. Neste caso, o número é superior na configuração com a peça de referência fora da câmara de ensaio.

Estes resultados podem ser explicados pela variação de temperatura ocorrida durante o turno. No turno da tarde a variação foi de 1,03°C, com temperaturas registadas entre 25,9°C e 26,93°C. Por sua vez, no turno da noite a variação foi de 2,77°C, com temperaturas registadas entre 23,93°C e 26,7°C.

Através deste estudo, constatou-se que a configuração usada atualmente, com a peça de referência dentro da câmara de ensaio, é a mais aconselhável. Com esta configuração, a peça de referência está menos suscetível a variações de temperatura sendo possível ter menor variabilidade associada ao ensaio de estanquidade.

4.3.8 Regressão entre temperatura ambiente e percentagem de retrabalho em cada turno

Com o objetivo de analisar se há alguma relação entre a temperatura ambiente e a percentagem de retrabalho referente ao reensaio ocorrida num turno, realizou-se um levantamento destes dados desde dezembro de 2015 até abril de 2015. Relativamente à temperatura, calculou-se a média das 8 horas do turno. Especificou-se um nível de significância de 5% para averiguar se existia relação.

Como é possível observar na figura T1 do anexo T, obteve-se um P-value de 0,203, logo não há evidência estatística que comprove que existe relação entre a temperatura ambiente e a percentagem de retrabalho referente ao reensaio em cada turno. É também possível constatar que o modelo descrito por esta regressão apenas explica 2,10% da variabilidade associada à percentagem de retrabalho. Na figura T2 do anexo T, estão representados os dados relativos ao levantamento efetuado. Pode-se tomar como exemplo o turno da noite, representado por “n”, para constatar o resultado obtido na regressão. Existem 4 registos com percentagem de retrabalho referente ao reensaio de 0%, com temperaturas médias entre 21,1°C e 23,0°C.

Este aspeto vai de encontro ao observado no desenho de experiências relativo a fatores meio ambiente e material. Apesar da temperatura ambiente ter influência no valor medido, apenas tinha 15% de contribuição para a explicação da variabilidade do modelo. Isto significa que, além da temperatura ambiente, há muitos outros fatores que contribuem para a variabilidade do ensaio como já foi possível verificar nos estudos apresentados durante esta fase do modelo.

Este estudo também foi feito com o propósito de verificar se havia alguma tendência quanto ao retrabalho referente ao reensaio em função do turno. Através da figura T2 do anexo T, verificou-se que todos os turnos têm registos com diferentes valores de percentagem de retrabalho, não havendo diferenças claramente significativas entre os diferentes turnos. Pode-se tomar como exemplo o turno da noite, pois este turno possui registos do retrabalho referente ao reensaio de 0%, contudo também tem registos de 9%, 18%, 23%, 30%, entre outros.

4.3.9 Análise dos tempos de ciclo das etapas constituintes do processo produtivo

Após os resultados obtidos no desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria método, foi efetuado um levantamento relativo ao tempo de ciclo das etapas constituintes do processo produtivo da referência em estudo. Na tabela 4 está representado este levantamento.

Tabela 4 – Etapas constituintes do processo produtivo e respetivos tempos de ciclo

Designação operação	Tempo colocar/retirar peça (s)	Tempo máquina (s)	Tempo trabalho manual (s)	Tempo de deslocação (s)	Quantidade máquinas	Tempo ciclo (s)
Curvagem de tubo	6,1	7,1	0	3,7	1	16,9
Recorte de Extremidades	6,9	13,0	0	1,6	1	21,5
Lavagem	3,0	13,3	0	1,6	1	17,9
Cravado	5,1	13,0	0	0	1	18,1
Controlo de geometria	0	0	4,2	0	1	4,2
Curvagem de fole - posto 1	6,3	9,9	0	2,1	1	18,3
Curvagem de fole - posto 2	6,2	11,5	0	2,1	1	19,8
Controlo de geometria	0	0	10,0	0	1	10,0
Fugómetro	5,1	29,5	0	0	2	17,3
Colocação de anti-calórico	0	0	14,9	2,5	1	17,4
Colocação de abraçadeiras	0	0	16,5	0	1	16,5
Aperto de abraçadeiras	0	0	40,6	4,8	2	25,1
Marcação Laser	5,5	15,9	0	0	1	21,4
Operações intermédias	0	0	12,7	3,3	1	16,0
Revisão Final	0	0	9,3	0	1	9,3

De acordo com a tabela, o “bottleneck” da linha de produção é a operação “Aperto de abraçadeiras” com um tempo de ciclo de 25,1 segundos. Quanto à etapa alvo de estudo, designada “Fugómetro”, tem um tempo de ciclo de 17,3 segundos.

Posteriormente, foi calculado o “takt time” da linha de produção em questão, tendo em conta a previsão das quantidades a produzir para todas as referências durante 4 meses. Esta previsão está apresentada na figura U1 do anexo U. Para saber a quantidade requerida a produzir por turno, calculou-se o quociente da quantidade total de peças a produzir pelo número de dias úteis dos 4 meses. O resultado obtido dividiu-se por 3, visto serem três turnos.

$$Qtd. a produzir por dia = \frac{30402 + 76604 + 55909 + 75946}{22 + 22 + 21 + 23} = 2715 \text{ peças/dia} \quad (4.1)$$

$$Qtd. a produzir por turno = \frac{2715}{3} = 905 \text{ peças/turno} \quad (4.2)$$

Quanto ao tempo de produção disponível num turno, aos 480 minutos (8 horas) disponíveis é necessário retirar 30 minutos relativos à pausa, 5 minutos para a reunião diária, 36 minutos para troca de referência e 10 minutos finais para efetuar limpeza e registo de dados.

$$Segundos disponíveis para produção = (480 - 30 - 5 - 36 - 10) \times 60 = 23940 \quad (4.3)$$

Deste modo, o “takt time” é de:

$$"Takt time" = \frac{23940}{905} = 26,45 \text{ segundos/peça} \quad (4.4)$$

Com o levantamento efetuado e com o cálculo apresentado, concluiu-se que o “bottleneck” da linha de produção está ajustado ao “takt time”. Verificou-se também que há possibilidade de aumentar o tempo de ciclo do ensaio de estanquidade de forma a conseguir uma medição com menor variabilidade entre medições e um valor médio menor. É, contudo, necessário ter em atenção que esse aumento tem de ter em conta a percentagem de peças reensaiadas e a percentagem de peças recuperadas devido a não-conformidades provenientes da sua produção.

Tendo em conta os dados de produção relativos ao levantamento efetuado no subcapítulo 3.1.2, determinou-se se o tempo de ciclo atual do Fugómetro é exequível tendo em conta o tempo de ciclo da linha de produção. Deste modo, calculou-se o máximo tempo de ciclo que o ensaio poderia ter:

$$Máximo tempo de ciclo do ensaio = \frac{25,1}{1 + 0,1289 + 0,0303} = 21,65 \text{ segundos} \quad (4.5)$$

Como o valor obtido é superior a 17,3, constatou-se que o tempo de ciclo atual do Fugómetro é exequível tendo em conta a percentagem de retrabalho devido ao reensaio, a percentagem de retrabalho devido a não-conformidades da peça e o tempo de ciclo disponível na linha de produção.

4.4 4ª Fase da Modelo: Melhorar

Neste subcapítulo serão apresentadas as melhorias implementadas com base nos resultados obtidos na fase anterior.

4.4.1 Melhorias implementadas no que diz respeito à corrente de ar

Através do desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material, constatou-se que quando a corrente de ar é analisada isoladamente, tem impacto significativo no valor médio medido (figura Q4 do anexo Q) e quando está em interação com outros fatores, tem uma significância maior no valor médio medido e na variabilidade (figura Q4 e Q15 do anexo Q).

Deste modo, procurou-se identificar possíveis fontes de corrente de ar na linha de produção. Identificou-se três casos onde a corrente de ar claramente está presente:

- Ventoinhas presentes nas linhas de produção para arrefecimento da temperatura ambiente;

- Abertura das portas que fazem ligação entre o armazém e o “shop floor”;
- Climatizadores evaporativos presentes nas linhas de produção para refrigeração do “shop floor”.

Para o primeiro caso, verificou-se que, em algumas situações, o uso das ventoinhas era desnecessário visto que a temperatura ambiente não o justificava. Os líderes das equipas foram alertados para estas ocorrências. Nas figuras V1 e V2 do anexo V observa-se a disposição das ventoinhas na linha de produção em estudo.

Para o segundo caso, definiu-se uma altura máxima de 2,5 metros para abertura das três portas existentes, tendo em conta a altura do comboio logístico, do “stacker” e do porta-paletes manual. Anteriormente, a abertura da porta atingia uma altura de cerca de 4 metros. Na figura V3 do anexo V pode ler-se o aviso referente a esta alteração numa das portas.

Para o terceiro caso, procurou-se, juntamente com a equipa de manutenção da fábrica, ajustar a direção da corrente dos climatizadores evaporativos de forma a não interferir nas linhas de produção.

4.4.2 Melhorias implementadas no que diz respeito à temperatura ambiente

Através do segundo desenho de experiências realizado, constatou-se que um aumento da temperatura ambiente causava uma diminuição quer no valor médio medido quer na variabilidade (figura Q7 e Q18 do anexo Q). Apesar de não possuir uma relação direta com a percentagem de retrabalho referente ao reensaio, como foi provado no subcapítulo 4.3.8, a sua contribuição para a variabilidade do ensaio sugere que sejam feitas melhorias neste fator.

Através da otimização deste DOE, considerando a temperatura da peça semelhante à temperatura ambiente, verificou-se se determinadas configurações de temperatura ambiente e temperatura da peça resultavam em valores médios de fuga dentro dos limites de especificação. Tendo em conta o bem-estar dos operadores, definiu-se um intervalo entre 22°C e 27°C. Verificou-se, através das figuras W1 e W2 do anexo W, que para as temperaturas extremas definidas, a peça testada teria um valor médio de medição no ensaio dentro do limite de especificação. Na configuração usada nestas figuras, teve-se em atenção que a temperatura da peça só poderia ser igual ou inferior 1°C relativamente à temperatura ambiente, devido às razões anteriormente apresentadas. Assim, as temperaturas definidas garantem que peças sem fugas cumprirão a especificação no ensaio de estanquidade. Para temperaturas dentro do intervalo definido, verificou-se que a peça testada também apresentava um valor médio de medição no ensaio dentro do limite de especificação.

Com o objetivo de verificar se as temperaturas no “shop floor” iam de encontro aos limites especificados, fez-se um levantamento, a cada hora, desde junho de 2015 até maio de 2016 como mostra a figura W3 do anexo W. Através da análise representada na figura W4 do anexo W, verificou-se que a média da temperatura no “shop floor” ao longo do intervalo em questão foi de 24,56°C. Também se constatou que 20% dos registos encontram-se fora dos limites definidos.

Para que não se registem temperaturas com valores fora dos limites definidos, será realizado um projeto Seis Sigma a executar por dois colaboradores da empresa. Esse projeto terá como principal objetivo controlar a temperatura ambiente no “shop floor” no intervalo de temperaturas anteriormente referido, tendo em conta o bem-estar dos operadores e o impacto da temperatura na variabilidade do ensaio de estanquidade.

4.4.3 Melhorias implementadas no que diz respeito à temperatura das peças

Considerando que as melhorias implementadas no que diz respeito à temperatura ambiente sejam atingidas com o projeto Seis Sigma, será necessário respeitar o tempo de arrefecimento

de 40 minutos da peça a ser testada. Para respeitar esse período, criou-se um registo e colocou-se no carro que armazena as peças. Após o armazenamento das peças que saem do forno estar concluída, o operador regista esse momento, acrescenta-lhe 40 minutos e regista o tempo resultante como o momento em que as peças podem começar a ser sujeitas ao ensaio de estanquidade. O operador que transporta o carro da zona de espera para a zona do ensaio de estanquidade apenas tem de verificar se já é possível submeter as peças. Este registo está representado na figura X1 e X2 do anexo X.

Verificou-se também que o abastecimento da zona de espera não estava a respeitar o FIFO, isto é, peças que já estavam naquela zona há mais tempo não seguiam para a etapa seguinte em detrimento de outras peças que lá se encontravam há menos tempo. Isto deve-se à falta de espaço para efetuar corretamente o abastecimento. Além disso, este local situa-se perto de um forno, sendo este facto preocupante, visto que quando o forno está ligado, as peças estão sujeitas a esse calor.

Para fazer face a estas duas razões, está a ser estudado um novo local de espera para colocar os carros antes que prossigam para o ensaio de estanquidade. Este terá de ter espaço para que o abastecimento das linhas seja feito de modo a respeitar o FIFO e não poderá estar próximo dos fornos de modo a não alterar a temperatura das peças.

Com estas melhorias, é assegurado que as peças são sujeitas ao ensaio de estanquidade à temperatura ambiente e pela ordem que saírem do forno. Serão assim evitadas as situações de arrefecimento rápido das peças através de ventoinhas.

4.4.4 Melhorias implementadas no que diz respeito às fases do ensaio de estanquidade

Tanto a referência em estudo como as outras referências pertencentes a esta linha de produção tinham a seguinte parametrização das fases do ensaio de estanquidade antes da implementação de melhorias (figura F1 do anexo F):

- Fase de Pré-enchimento: 0 segundos;
- Fase de Enchimento: 3 segundos;
- Fase de Estabilização: 15 segundos;
- Fase de Equalização: 0,5 segundos;
- Fase de Teste ou Medição: 4 segundos;
- Fase de Esvaziamento e marcação da peça: 0,1 segundos.

No subcapítulo 4.3.9 concluiu-se que o tempo de ciclo do ensaio de estanquidade era menor que o “bottleneck” da linha de produção, havendo possibilidade de aumentar o valor das parametrizações das fases constituintes do ensaio.

Pela otimização do desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria método, constatou-se que a atual parametrização usada no ensaio, resultaria num valor médio de medição no ensaio de 12,79 Pa/s e uma variabilidade entre medições de 1,24 Pa/s na peça testada (figura Y1 do anexo Y). Isto quer dizer que a peça testada no DOE não estaria conforme a especificação requerida. Isto poderá indicar que dada a parametrização atual, o valor médio medido das peças poderá estar a ser elevado assim como a variabilidade entre medições. É importante estudar a variabilidade entre medições, pois existem casos em que as peças necessitam de ser sujeitas novamente ao ensaio de estanquidade.

Inicialmente, decidiu-se implementar melhorias na fase de equalização visto que esta tinha influência significativa tanto no valor médio medido como na variabilidade e a sua

parametrização atual encontrava-se com um valor muito reduzido. Deste modo, alterou-se a parametrização para 4 segundos. Através da otimização do desenho de experiências, constatou-se que este aumento permitiria obter um valor médio de medição no ensaio de 9,15 Pa/s e uma variabilidade entre medições de 0,83 Pa/S na peça testada (figura Y2 do anexo Y). Esta alteração permitiria obter um resultado dentro da especificação do cliente no caso da peça ser submetida ao ensaio de estanquidade.

Com esta melhoria, o tempo de ciclo do ensaio de estanquidade passaria a ser de 19 segundos. Ainda era possível alterar o tempo de ciclo sem prejudicar o “bottleneck” da linha de produção. O valor médio de medição no ensaio para a peça testada já se encontra dentro do limite de especificação, apesar de se encontrar perto desse limite. Tendo em conta a variabilidade entre medições obtida, esta parametrização poderia ainda estar a ser prejudicial para o ensaio de estanquidade.

Deste modo, novamente com base na otimização do desenho de experiências e restringindo o tempo total de todas as fases para 30 segundos, decidiu-se alterar as parametrizações para:

- Fase de Pré-enchimento: 0 segundos;
- Fase de Enchimento: 3,5 segundos;
- Fase de Estabilização: 10,5 segundos;
- Fase de Equalização: 6 segundos;
- Fase de Teste ou Medição: 10 segundos;
- Fase de Esvaziamento e marcação da peça: 0,1 segundos.

Para a peça testada, esta parametrização permitiria obter um valor médio de medição no ensaio de 4,57 Pa/s e uma variabilidade entre medições de 0,52 Pa/s (figura Y3 do anexo Y). Esta parametrização já indica uma medição com um valor médio abaixo do meio do limite de especificação e uma variabilidade entre medições reduzida. Com esta parametrização, o tempo de ciclo do ensaio de estanquidade passaria a ser de 20,8 segundos.

4.4.5 Melhorias implementadas aos limites do valor de fuga

Como já foi referido anteriormente, o limite de especificação do cliente é de 10 Pa/s. Atualmente, os limites aceitáveis para o valor de fuga de uma peça, estavam definidos entre - 2,5 Pa/s e 7,5 Pa/s. Dado estes limites, verificou-se que havia algumas peças que estavam a ser retrabalhadas sendo o seu valor de fuga menor que 10 Pa/s e que as peças com valor de fuga negativo, raramente eram inferiores a 1,0 Pa/s. Deste modo, redefiniu-se os limites para - 1,25 Pa/s a 8,75 Pa/s.

Constatou-se também que a primeira repetição do ensaio de estanquidade estava a ser feita a todas as peças, mesmo que o resultado do ensaio tivesse sido elevado. Como é esperado que todas as melhorias implementadas reduzam a variabilidade associada à medição e como se constatou que a atual parametrização assegurava uma variabilidade reduzida, decidiu-se que esta primeira repetição aconteceria apenas a peças com valor de fuga menor que 15 Pa/s. As peças cuja primeira medição desse um resultado acima deste valor, seguiam de imediato para a etapa do forno.

Com estas duas melhorias, evita-se um reensaio desnecessário e, consequentemente, ganha-se capacidade de produção.

4.4.6 Melhorias implementadas a fatores pertencentes à categoria dispositivo

Após os resultados obtidos no desenho de experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo, decidiu-se retirar o reservatório que se encontrava entre a rede de ar

comprimido e a entrada de ar do Fugómetro. Segundo os resultados obtidos no desenho de experiências, a sua presença provocava um aumento no valor médio medido.

Quanto às ferramentas utilizadas, foi provado no teste de hipóteses apresentado no subcapítulo 4.3.2 que a ferramenta com peça de referência era mais favorável que a ferramenta sem peça de referência. Para a referência em estudo, existem três ferramentas, duas com peça de referência e outra sem peça de referência. Como apenas são usadas duas ferramentas no ensaio de estanquidade, foi decidido, juntamente com os responsáveis pela linha de produção, que seriam utilizadas as duas ferramentas com peça de referência.

4.4.7 Dados relativos à produção após implementação das melhorias

Tendo como objetivo verificar se o estudo desenvolvido durante a dissertação teve os resultados esperados, efetuou-se um levantamento dos dados relativos à produção desde que as melhorias foram sendo implementadas. Na tabela 5 são apresentados os dados da produção.

Tabela 5 – Dados da produção após implementação das melhorias

	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Total
Nº peças entradas em linha	5306	4035	6274	15615
Nº peças ok	4379	3273	5306	12958
Nº peças consideradas como sucata	38	6	31	75
<i>Nº peças consideradas como sucata devido aos reensaio</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Nº peças retrabalhadas devido a não-conformidades da peça	205	130	72	407
Nº peças reensaidas	684	626	865	2175
Percentagem sucata	0,72	0,15	0,49	0,48
Percentagem retrabalho devido a não-conformidades da peça	3,86	3,22	1,15	2,61
Percentagem retrabalho devido ao reensaio	13,51	16,06	14,02	14,37

Deve-se ter em atenção que para o cálculo da percentagem de retrabalho devido ao reensaio apenas são consideradas o número de peças ok, o número de peças consideradas como sucata devido aos reensaio e o número de peças reensaiadas.

Como é possível observar na tabela 5, a percentagem de retrabalho devido a não-conformidades da peça manteve-se nos valores apresentados no subcapítulo 3.1.2, cerca de 3%. A percentagem de retrabalho devido ao reensaio no turno da manhã e da tarde sofreu uma ligeira diminuição, de 15,97% para 13,51% e de 16,43% para 16,05%, respetivamente. No turno da noite sofreu um aumento de 7,46% para 14,02%. Como as melhorias não foram todas implementadas ao mesmo tempo e a monitorização da temperatura apenas foi realizada na última semana é de crer que os resultados irão ser melhores. Na figura 26, podemos verificar as causas, em cada turno, que provocaram o retrabalho e a sua frequência relativa.

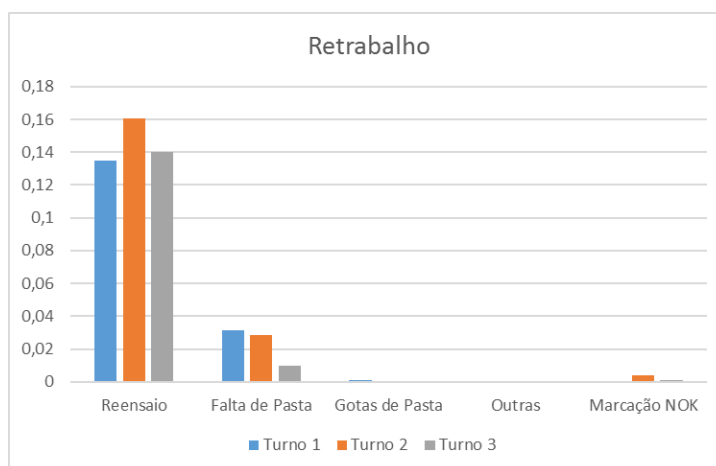


Figura 26 - Causas do retrabalho no período de implementação de melhorias

Através dos dados referentes à percentagem de retrabalho devido ao reensaio durante os turnos onde se produziu a referência em estudo, durante os dois períodos referentes aos levantamentos efetuados, efetuou-se uma análise de capacidade antes/depois das melhorias, representada na figura 27. Especificou-se um nível de significância de 5%. Em termos de média e desvio padrão do processo, não há evidência estatística de uma redução/mudança, uma vez que os “P-value” obtidos foram 0,441 e 0,542, respetivamente. Também é possível observar na figura 27, algumas características do processo antes/depois das melhorias e as suas conseqüentes mudanças.

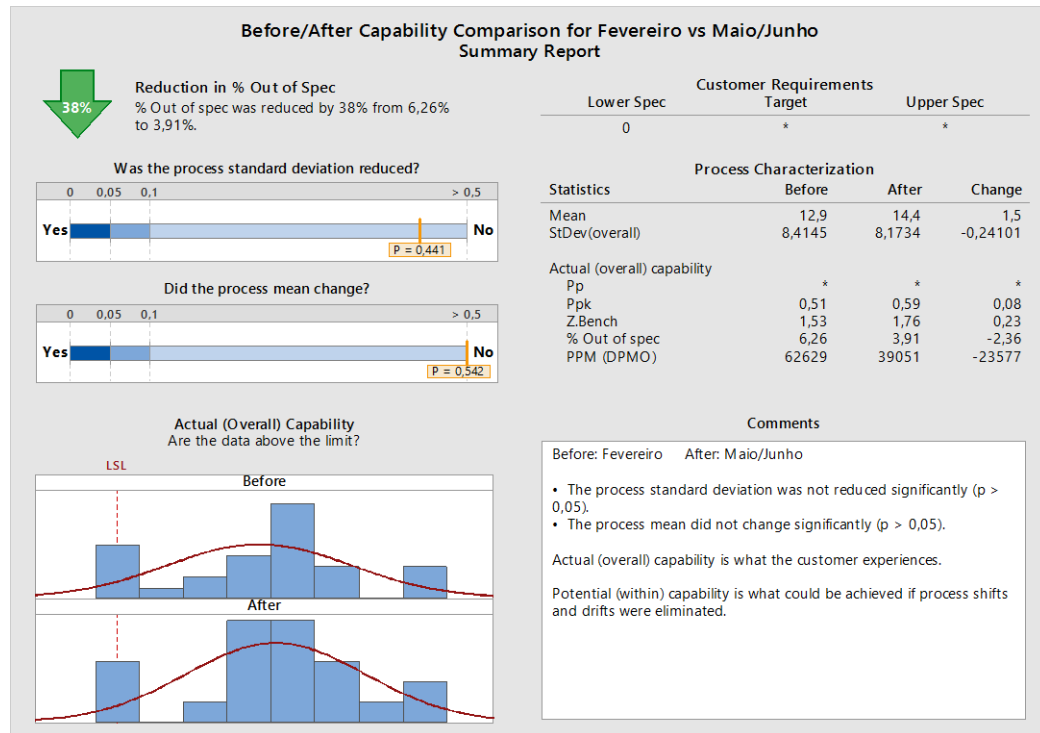


Figura 27 – Análise de capacidade do processo antes/depois das melhorias

No **único de dia de produção** em que as melhorias estavam todas presentes, único dia na qual a monitorização da temperatura das peças foi controlada e a parametrização final escolhida foi implementada, foi feita uma produção da referência em estudo das 14 às 06 horas da manhã. Entre as 14 e as 19, o retrabalho devido ao reensaio foi de 6% e entre as 02:30 e as 06 foi de 5%. Durante o intervalo entre as 19 e as 02:30, o retrabalho devido ao reensaio foi de 15%. Esse intervalo compreendeu o intervalo do turno da tarde e o início do turno da noite. Verificou-se que, durante a noite, a peça encontrava-se mais fria que a temperatura ambiente, numa diferença superior a 1°C e, como tal, os resultados obtidos no Fugómetro eram todos negativos.

A contribuição do turno da tarde para o retrabalho referente ao reensaio de 15% foi o efeito intervalo do turno. Esta paragem de produção, poderá ter provocado uma diminuição da temperatura da peça de referência, ficando esta a uma temperatura menor que a temperatura das peças a ser testadas.

Com o acompanhamento deste dia de produção, concluiu-se que as melhorias implementadas permitem obter diminuições no indicador referente ao retrabalho devido ao reensaio. Contudo, ainda é necessário estudar a influência dos fatores acima referidos para que o indicador se mantenha na ordem dos 5%.

Por fim, determinou-se se o novo tempo de ciclo do Fugómetro é exequível tendo em conta o tempo de ciclo da linha de produção. Deste modo, calculou-se o máximo tempo de ciclo que o ensaio poderia ter para os dois casos seguintes:

Tendo em conta os resultados dos dados de produção relativos ao levantamento efetuado:

$$\text{Máximo tempo de ciclo do ensaio} = \frac{25,1}{1 + 0,1437 + 0,0261} = 21,46 \text{ segundos} \quad (4.6)$$

Tendo em conta que a percentagem de retrabalho devido ao reensaio irá ser de 5%:

$$\text{Máximo tempo de ciclo do ensaio} = \frac{25,1}{1 + 0,05 + 0,0261} = 23,32 \text{ segundos} \quad (4.7)$$

Como os valores obtidos são superiores a 20,8 segundos, concluiu-se que o novo tempo de ciclo do Fugómetro é exequível tendo em conta a percentagem de retrabalho devido ao reensaio, a percentagem de retrabalho devido a não-conformidades da peça e o tempo de ciclo disponível na linha de produção.

4.5 5ª Fase do modelo DMAIC: Controlar

Neste subcapítulo pretende-se que as melhorias implementadas sejam mantidas depois da finalização do projeto, tendo por base um plano de controlo, cujo detalhe será apresentado neste capítulo.

4.5.1 Controlo de fatores com influência na variabilidade do ensaio de estanquidade

Elaborou-se um plano de controlo, representado na figura 28, onde são identificados o nome dos fatores a controlar, onde será medido, o “output” que irá beneficiar desse controlo, o tamanho da amostra que se irá controlar, a especificação definida para o fator, onde está registado esse fator, a frequência na qual o controlo irá ser realizado e, por fim, quem o irá realizar.

No que diz respeito às parametrizações do ensaio de estanquidade, estas nunca são alteradas nos Fugómetros usados, visto serem iguais para todas as referências da linha de produção. Porém, este controlo é feito pelo líder de equipa, semanalmente, com base na instrução disponibilizada. O mesmo acontece para os limites de especificação definidos.

Quanto ao tempo de arrefecimento da peça, este controlo é feito pela “hora ok para produzir” registada na etiqueta elaborada para o efeito. O operador é responsável pelo controlo, visto que é ele que irá verificar a hora. Relacionado com este fator, está o cumprimento do FIFO no abastecimento da zona de espera. Este controlo será feito diariamente pelo operador e semanalmente pelo MQE. Também relacionada com o controlo do fator tempo de arrefecimento está o controlo da temperatura da peça. Se for controlado este tempo, a temperatura da peça também estará

Quanto à corrente de ar, é feita uma inspeção mensal, pela manutenção, relativamente à altura das portas para que seja respeitada a altura definida. Para tal, existem placards, representados na figura Z1 do anexo Z, colocados nas portas onde estão registadas as datas de realização e a rubrica de quem a efetuou.

Quanto à temperatura ambiente no “shop floor”, esta é controlada diariamente por um trabalhador pertencente à manutenção que tem de fazer o seu levantamento e registo num ficheiro já existente.

No que diz respeito ao uso da ferramenta com peça de referência, este controlo é feito pelo líder de equipa no início de produção de cada referência. Pode ser vista como uma simples verificação do uso de um equipamento.

Six Sigma Process Control Plan			
Process Name:	<u>Leakage test</u>	Prepared by:	<u>João Pinto</u>
Customer	<u> </u> Int/Ext <u> </u>	Approved by:	<u> </u>
Location:	<u> </u>	Approved by:	<u> </u>
Area:	<u> </u>	Approved by:	<u> </u>
			Page: <u> </u> of <u> </u>
			Document No: <u> </u>
			Revision Date: <u> </u>
			Supersedes: <u> </u>

Specification Characteristic	Measurement Method	CTQ		Sample Size	Specification/ Requirement		Where Recorded	Frequency	Who Measures		
		KPOV	KPIV		USL	LSL					
Fill time	Leakage Device	% rework	-	1 part	3 seconds	Instruction Control	Weekly	Team Leader			
Stabilize time	Leakage Device	% rework	-	1 part	17 seconds	Instruction Control	Weekly	Team Leader			
Equalize time	Leakage Device	% rework	-	1 part	6 seconds	Instruction Control	Weekly	Team Leader			
Measure time	Leakage Device	% rework	-	1 part	4 seconds	Instruction Control	Weekly	Team Leader			
Specification Limits	Leakage Device	% rework	-	1 part	(-)1,25 Pa/s to 8,75 Pa/s	Instruction Control	Weekly	Team Leader			
Part's cooling time	Label	% rework	-	1 part	40 minutes	Label	100%	Operator			
Air Flow	Preventive maintenance plan	% rework	-	3 doors	Door's height: 2,5 meters	Inspection label	Monthly	Maintenance			
Shop floor temperature	Six sigma project monitoring	% rework	-	7 sensors	22 °C - 27 °c	Excel File	Daily	Maintenance			
Use of reference part	Visual Check	% rework	-	1 part	Yes	-	Beginning of production	Team Leader			
Use of FIFO	Visual Check	% rework	-	1 car	Yes	-	Daily/ Weekly	Manufacturing Quality Engineer / Operator			

Figura 28 – Plano de controlo

4.6 Criação de linhas de orientação para novos projetos

Após o trabalho desenvolvido, foi criado um documento para uso interno na empresa onde é brevemente apresentado o trabalho desenvolvido durante a dissertação. Nele estão contemplados os testes realizados, as conclusões obtidas e as melhorias implementadas. O propósito deste documento advém do interesse da empresa estudar o ensaio de estanquidade noutros produtos fabricados.

Deste modo, os novos projetos terão como base o estudo já desenvolvido, adaptando o trabalho já realizado para o novo produto. Dado que já foram estudados alguns fatores que não se revelaram importantes, estes projetos poderão focar o seu estudo noutros que não foram alvo de estudo na dissertação. Estas linhas de orientação podem ser consultadas no documento “Linhas de orientação para novos projetos” anexado a este trabalho como ficheiro autónomo.

5 Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

O estudo do problema abordado na dissertação permitiu que o desenvolvimento do projeto tivesse duas vertentes distintas. A primeira está relacionada com a investigação e com as experiências realizadas no laboratório de metrologia, numa vertente mais teórica. A segunda está relacionada com o trabalho desenvolvido na linha de produção, numa vertente mais prática. Nesta vertente foi possível ter uma percepção de como a produção trabalha diariamente, isto é, das etapas produtivas, dos procedimentos seguidos e até do trabalho realizado pelos operadores.

Após a conclusão do trabalho realizado, atingiu-se os objetivos estipulados no início do projeto. Com as melhorias implementadas e com a resolução dos problemas já identificados, é de crer que a percentagem de retrabalho referente ao reensaio irá reduzir ainda mais do que o resultado obtido no segundo levantamento efetuado na linha de produção. Após a estabilização deste indicador, a restante percentagem dever-se-á à variabilidade associada às características da peça e à temperatura ambiente.

Com a redução da variabilidade associada ao ensaio e com a otimização do tempo de ciclo dadas as alterações efetuadas nas parametrizações das fases do ensaio, a medição do valor de fuga é, neste momento, mais fiável. Deste modo, será expectável que o número de reclamações do cliente devido a peças que não cumpram a especificação requerida, seja muito reduzido ou mesmo inexistente.

À medida que o trabalho foi sendo desenvolvido, houve sempre um interesse demonstrado por todos os elementos da empresa na partilha de dados e na sugestão de novos estudos. Os resultados obtidos foram sendo aplicados noutras linhas de produção. Pode-se tomar como exemplo a validação do sistema de medição. Após esta etapa ter sido concluída, foram efetuadas validações a outros sistemas de medição com base nos procedimentos seguidos na dissertação.

Outro aspeto interessante a reter foi o âmbito do projeto não se ter restringido apenas ao ensaio de estanquidade. Na tentativa de implementar melhorias, detetou-se outras oportunidades de atuação na fábrica. A definição da altura da porta que faz ligação entre o armazém e a produção e os problemas detetados relacionados com o local onde são armazenados os carros são exemplos dessas oportunidades.

Ao longo do projeto, foi também possível tomar conhecimento de documentação que é necessária ter e/ou fazer para um dado processo ou produto poderem ser utilizados ou fabricados. São exemplos disso as intruções de controlo, o plano de controlo de um processo produtivo, o FMEA quer do produto quer do processo, entre outros.

Quanto a trabalhos futuros, será realizado um estudo para compreender o comportamento da temperatura da peça na passagem do dia para a noite, um estudo relativo ao fator paragem do turno com especial foco na temperatura da peça de referência e uma análise ao circuito para deteção de eventuais fugas devido a ligações.

Seria interessante avaliar, ainda com esta referência, fatores relativos à categoria medição. Esta avaliação passaria pela possibilidade de usar outros aparelhos de medição com diferentes características relacionadas com a medição, como por exemplo, a resolução do aparelho. Inicialmente, proceder-se-ia a um estudo comparativo entre os dois tipos de Fugómetros existentes na empresa. De seguida, conduzir-se-ia um estudo de mercado para avaliar as outras possibilidades existentes e, posteriormente, decidir com base em estudos a realizar se a obtenção de melhores resultados no ensaio de estanquidade compensaria o investimento a fazer na compra de novos equipamentos.

Ainda na categoria dos tubos EGR, seria pertinente estudar os fatores pertencentes à categoria material denominados “Geometria da peça” e “Volume da peça”. Existem tubos EGR, a serem atualmente produzidos, com geometria e volume diferentes do tubo testado durante a dissertação. Com a realização destes estudos referentes à categoria medição e material, o ensaio de estanquidade relativo a este tipo de produto já se encontraria finalizado.

Com todo o conhecimento obtido nos tubos EGR, seria interessante aplicá-lo no estudo do ensaio de estanquidade nos coolers EGR e nos módulos de controlo de velas incandescentes. Estes tipos de produtos não foram até à data alvos de estudo no que diz respeito a esta etapa do processo.

Por fim, depois de todos os produtos terem sido avaliados, a criação de um caderno de encargos seria a última etapa deste extenso estudo. Este seria utilizado para uso corrente e para definir todos os detalhes que dizem respeito ao ensaio quando um novo produto for lançado para produção.

Referências

www.borgwarner.com, acessado a 24 março 2016.

Abreu, Patrícia. 2011. "Projeto Seis Sigma para melhoria do processo de análise de produtos defeituosos : um caso de estudo na indústria automóvel", Universidade do Minho. <http://hdl.handle.net/1822/16393>.

Academy, Six Sigma. 2002. *The Black Belt Memory Jogger*.

Arnheiter, Edward D. e John Maleyeff. 2005. "The integration of lean management and Six Sigma". *The TQM Magazine* no. 17 (1):5-18. <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/09544780510573020>.

Dana Ginn, Evelyn Varner 2004. *The Design for Six Sigma Memory Jogger*. ed GOAL/QPC.

Michael Brassard, Lynda Finn, Dana Ginn, Diane Ritter. 1994. *The Six Sigma Memory Jogger II*. ed GOAL/QPC.

Parast, Mahour Mellat. 2011. "The effect of Six Sigma projects on innovation and firm performance". *International Journal of Project Management* no. 29 (1):45-55. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786310000086>.

Pyzdek, Thomas. 2003. *The Six Sigma Handbook. A complete guide for Green Belts, Black Belts, and Manager at all levels*. Editado por McGraw-Hill

Montgomery, Douglas C. 2001. *Design and Analysis of Experiments*

ISO/IEC Guide 98-3:2008. "Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)"

ANEXO A: Planeamento do projeto

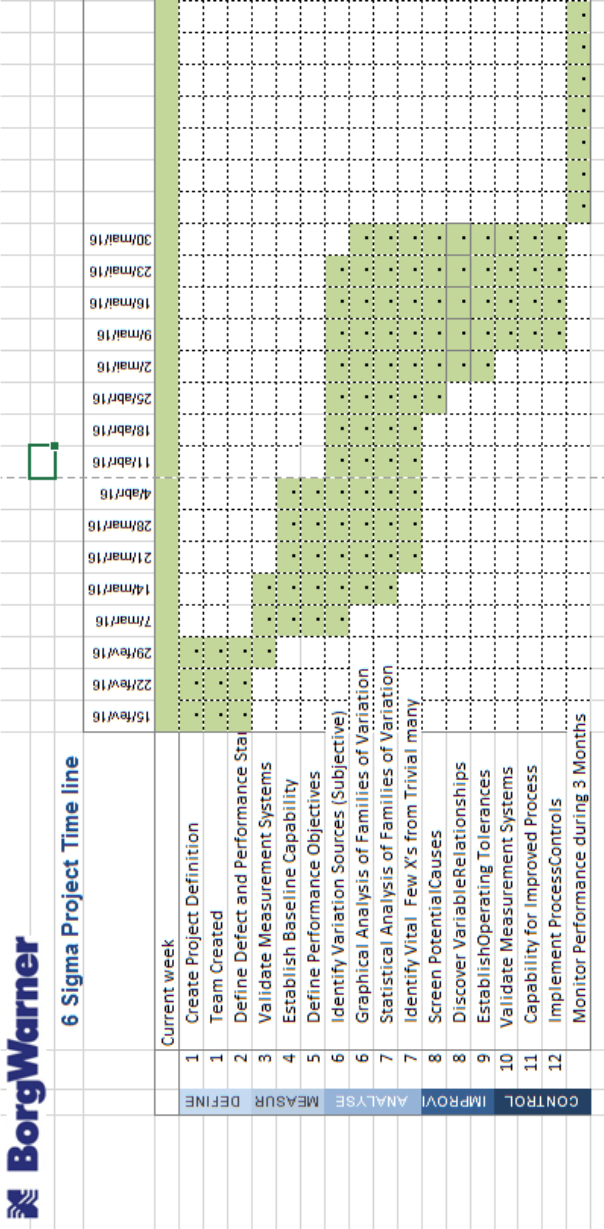


Figura A1 – Planeamento do projeto

ANEXO B: Tabela de correspondência entre rendimento, nível sigma a curto e longo termo e defeito por milhão de oportunidades

Note: The 1.5 sigma shift is included in this chart.

Long-term Yield	Long-term Sigma	Short-term Sigma	Defects per Million	Long-term Yield	Long-term Sigma	Short-term Sigma	Defects per Million
99.99966%	4.5	6.0	3.4	96.410%	1.8	3.3	35,900
99.9995%	4.4	5.9	5	95.540%	1.7	3.2	44,600
99.9992%	4.3	5.8	8	94.520%	1.6	3.1	54,800
99.9990%	4.2	5.7	10	93.320%	1.5	3.0	66,800
99.9980%	4.1	5.6	20	91.920%	1.4	2.9	80,800
99.9970%	4.0	5.5	30	90.320%	1.3	2.8	96,800
99.9960%	3.9	5.4	40	88.50%	1.2	2.7	115,000
99.9930%	3.8	5.3	70	86.50%	1.1	2.6	135,000
99.9900%	3.7	5.2	100	84.20%	1.0	2.5	158,000
99.9850%	3.6	5.1	150	81.60%	0.9	2.4	184,000
99.9770%	3.5	5.0	230	78.80%	0.8	2.3	212,000
99.9670%	3.4	4.9	330	75.80%	0.7	2.2	242,000
99.9520%	3.3	4.8	480	72.60%	0.6	2.1	274,000
99.9320%	3.2	4.7	680	69.20%	0.5	2.0	308,000
99.9040%	3.1	4.6	960	65.60%	0.4	1.9	344,000
99.8650%	3.0	4.5	1,350	61.80%	0.3	1.8	382,000
99.8140%	2.9	4.4	1,860	58.00%	0.2	1.7	420,000
99.7450%	2.8	4.3	2,550	54.00%	0.1	1.6	460,000
99.6540%	2.7	4.2	3,460	50.00%	0.0	1.5	500,000
99.5340%	2.6	4.1	4,660	46.00%	-0.1	1.4	540,000
99.3790%	2.5	4.0	6,210	42.00%	-0.2	1.3	580,000
99.1810%	2.4	3.9	8,190	38.00%	-0.3	1.2	620,000
98.930%	2.3	3.8	10,700	34.00%	-0.4	1.1	660,000
98.610%	2.2	3.7	13,900	31.00%	-0.5	1.0	690,000
98.220%	2.1	3.6	17,800	27.00%	-0.6	0.9	730,000
97.730%	2.0	3.5	22,700	24.00%	-0.7	0.8	760,000
97.130%	1.9	3.4	28,700				

Sigma Conversion Chart

Figura B1 – Tabela de correspondência entre rendimento, nível sigma a curto e longo prazo e defeito por milhão de oportunidades

ANEXO C: Desenho técnico da peça testada

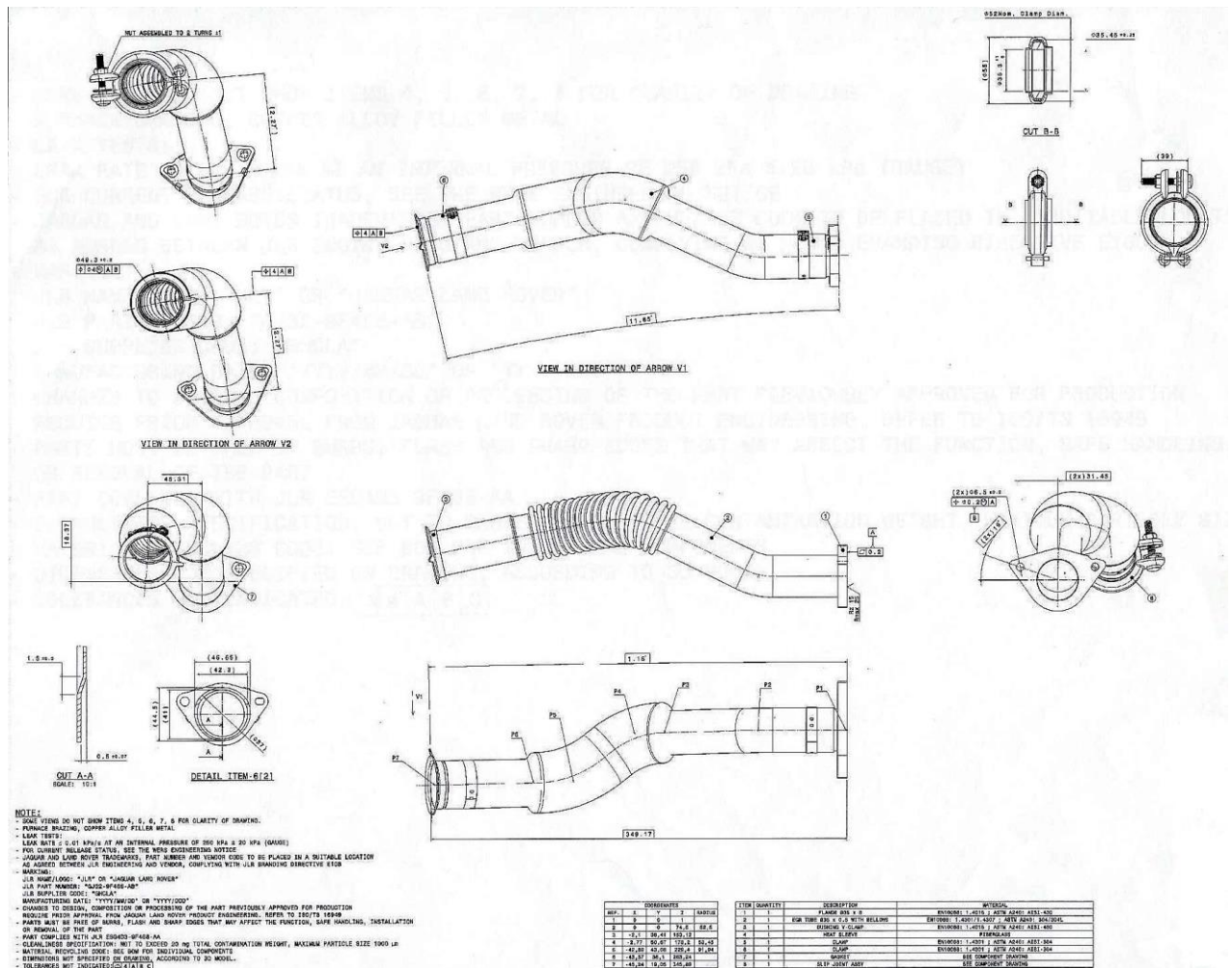


Figura C1 – Desenho técnico da peça testada

ANEXO D: Fluxograma do Processo produtivo da peça estudada

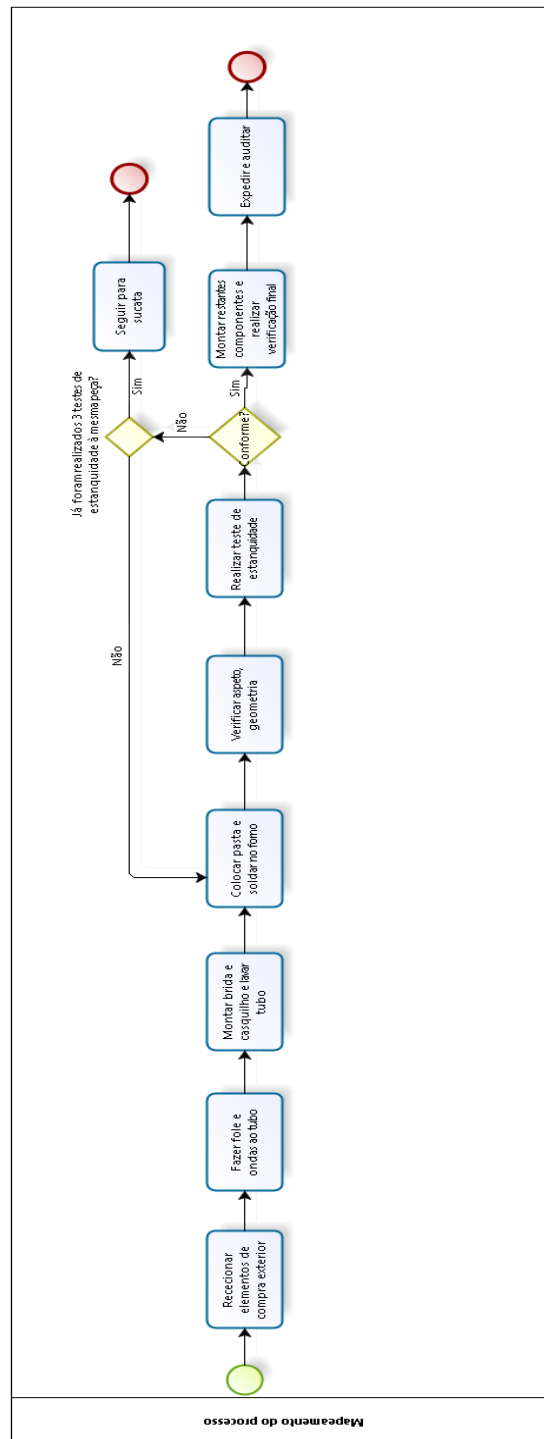


Figura D1 - Fluxograma do Processo produtivo da peça estudada

ANEXO E: Fotografias relativas aos elementos constituintes do ensaio de estanquidade e às ferramentas usadas nesse ensaio



Figura E1 - Elementos constituintes do ensaio de estanquidade

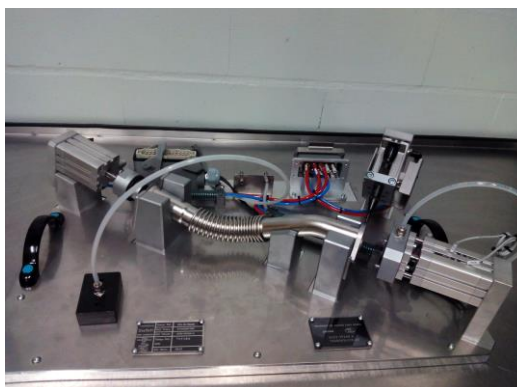


Figura E2 - Ferramenta sem peça de referência

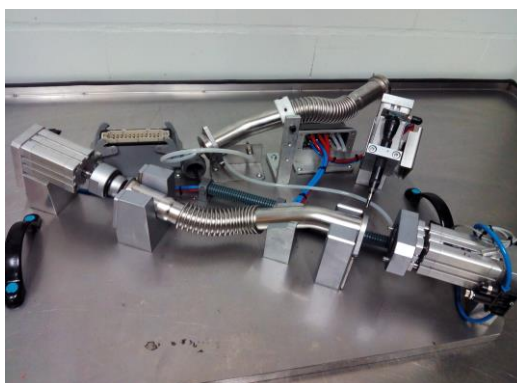


Figura E3 - Ferramenta com peça de referência

ANEXO F: Instrução de controlo usada no ensaio de estanquidade (até à data de início do projeto)

BorgWarner		INSTRUÇÃO DE CONTROLO		GAMA Nº: GC-03949	
Código Interno: [REDACTED]		Denominação Peça: [REDACTED]		DATA: 05-10-2015	
Refª Cliente: [REDACTED]		Denominação Operação: Revisar, montar e fugar.		Operação: [REDACTED]	
				Plano vigilância: [REDACTED]	

3 - FUGADO	PARÂMETROS FUGADO					
		Tempo (seg)	Objetivo	Limite mín.	Limite máx.	Unidade
	Preenhado	0	4,0	2,3	4,5	bar
	Llenado	3	2,5	2,3	4,5	bar
	Estabilizar	15	2,5	2,3	2,7	bar
	Igualar	0,5	-	-2000	2000	Pa
	Medir	4	-	-10	30	Pa

Nº	Controlo a realizar	Medida e tolerância	Melo controlo	A realizar por	Frequência	Registos
3	Estanquidade CC	Ver parâmetros no croquis	Microfugómetro e maquete de fugado	Autocontrolo	100%	DT.9.1.5.1
	Verificação fugómetro CC CC	Fuga na peça padrão	Padrão com fuga	Autocontrolo	Início Série	QF-7363

VISTOS	M.G.E./P.L.	A.E.	OBSERVAÇÕES: Caract. Condição CC	Controlo revisões	Data 25/09/15 - Reestruturação da gama. 05/10/15 - Alteração dos parâmetros fugado. 13/07/15 - Evolução da refª.

Figura F1 – Instrução de controlo

Anexo G: Gama de Operação




BorgWarner		GAMA DE OPERAÇÃO		Data da revisão:	24-02-2016		
				Página:	1	de	5
Ref. BW:	Ref. de cliente:	Descrição da peça:					
		EGR TUBE ASSEMBLY					
Código do conjunto:	Código de operação:	Descrição da operação:					
		Revisar, montar e fugar					
Suboperação:	Descrição da suboperação:	Posto:	Nº Máquina:				
0012	Fugar	-					
Descrição do modo operatório:							
<p>1ª Colocar a peça na ferramenta de fugado.</p>  <p>Nota: Passar peças padrão para validação de arranque do início do turno / troca de referência.</p>		<p>2ª Accionar botão "início de ciclo".</p> 		<p>3ª Finalizado o teste de fugado, se OK, verificar que a peça tem o ponto de marcação e enviar para a seguinte operação. Se NOK, colocar a peça na jaula referente ao posto a ser utilizado.</p> 			

Figura G1 – Gama de operação do ensaio de estanquidade

6 Sigma Project Charter

PROJECT VALIDATION	
6 Sigma Black Belt	João Pinto
MBB Coach	Hugo Silva
Process Owner	Oswaldo França
Finance	Ricardo Moreira
Plant Manager	Pedro Abreu

ANEXO I: Figuras resultantes da validação da Ferramenta com peça de referência

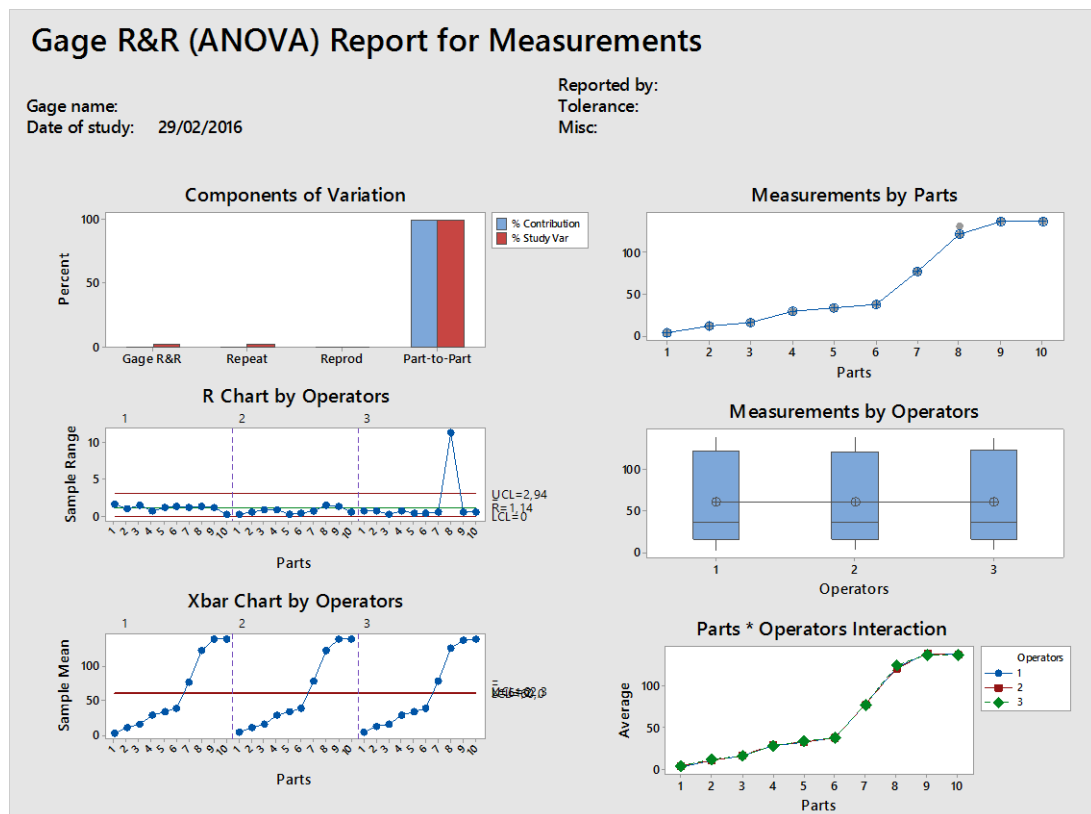


Figura I1 - Relatório do teste “Gage R&R” à Ferramenta com peça de referência

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	1,52	0,05
Repeatability	1,50	0,05
Reproducibility	0,02	0,00
Operators	0,02	0,00
Part-To-Part	2911,80	99,95
Total Variation	2913,33	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1,2349	7,409	2,29
Repeatability	1,2248	7,349	2,27
Reproducibility	0,1572	0,943	0,29
Operators	0,1572	0,943	0,29
Part-To-Part	53,9611	323,767	99,97
Total Variation	53,9752	323,851	100,00

Number of Distinct Categories = 61

Figura I2 - Tabela do teste "Gage R&R" à Ferramenta com peça de referência

ANEXO J: Figuras resultantes da Ferramenta sem peça de referência

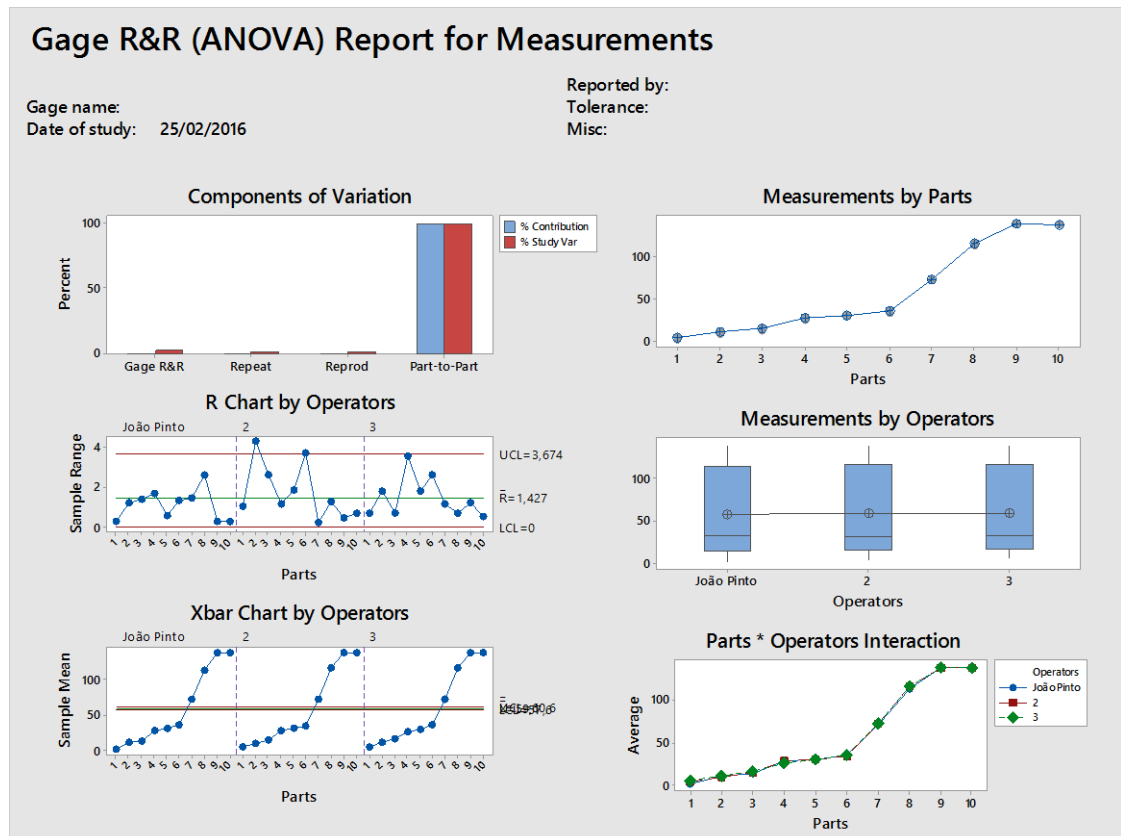


Figura J1 - Relatório do teste “Gage R&R” à Ferramenta sem peça de referência

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	1,74	0,06
Repeatability	0,83	0,03
Reproducibility	0,91	0,03
Operators	0,00	0,00
Operators*Parts	0,91	0,03
Part-To-Part	2838,27	99,94
Total Variation	2840,00	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1,3190	7,914	2,48
Repeatability	0,9098	5,459	1,71
Reproducibility	0,9550	5,730	1,79
Operators	0,0000	0,000	0,00
Operators*Parts	0,9550	5,730	1,79
Part-To-Part	53,2754	319,652	99,97
Total Variation	53,2917	319,750	100,00

Number of Distinct Categories = 56

Figura J2 - Tabela do teste "Gage R&R" à Ferramenta sem peça de referência

ANEXO K: Figuras resultantes da validação da Ferramenta sem peça de referência na linha de produção

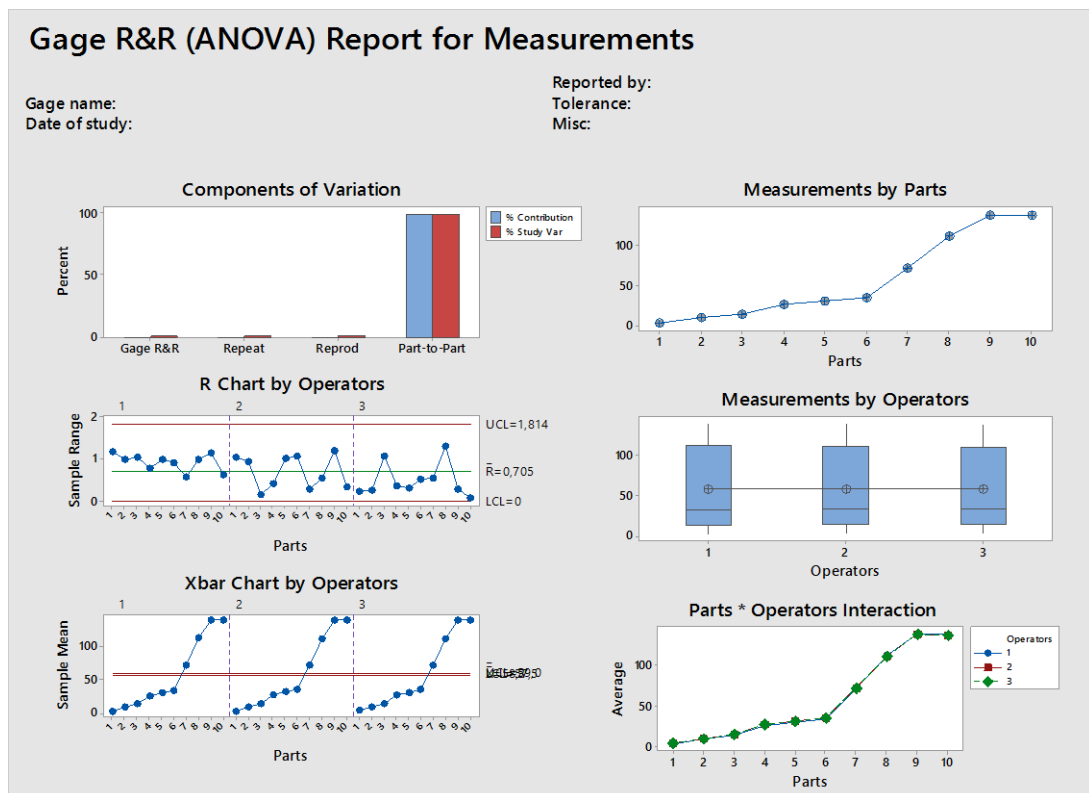


Figura K1 – Relatório do teste "Gage R&R" à Ferramenta sem peça de referência na linha de produção

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,45	0,02
Repeatability	0,18	0,01
Reproducibility	0,27	0,01
Operators	0,03	0,00
Operators*Parts	0,25	0,01
Part-To-Part	2826,10	99,98
Total Variation	2826,55	100,00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%STV)
Total Gage R&R	0,6741	4,045	1,27
Repeatability	0,4246	2,547	0,80
Reproducibility	0,5236	3,142	0,98
Operators	0,1677	1,006	0,32
Operators*Parts	0,4960	2,976	0,93
Part-To-Part	53,1611	318,966	99,99
Total Variation	53,1653	318,992	100,00

Number of Distinct Categories = 111

Figura K2 - Tabela do teste "Gage R&R" à Ferramenta sem peça de referência na linha de produção

ANEXO L: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado à média das medições realizadas com ou sem peça de referência

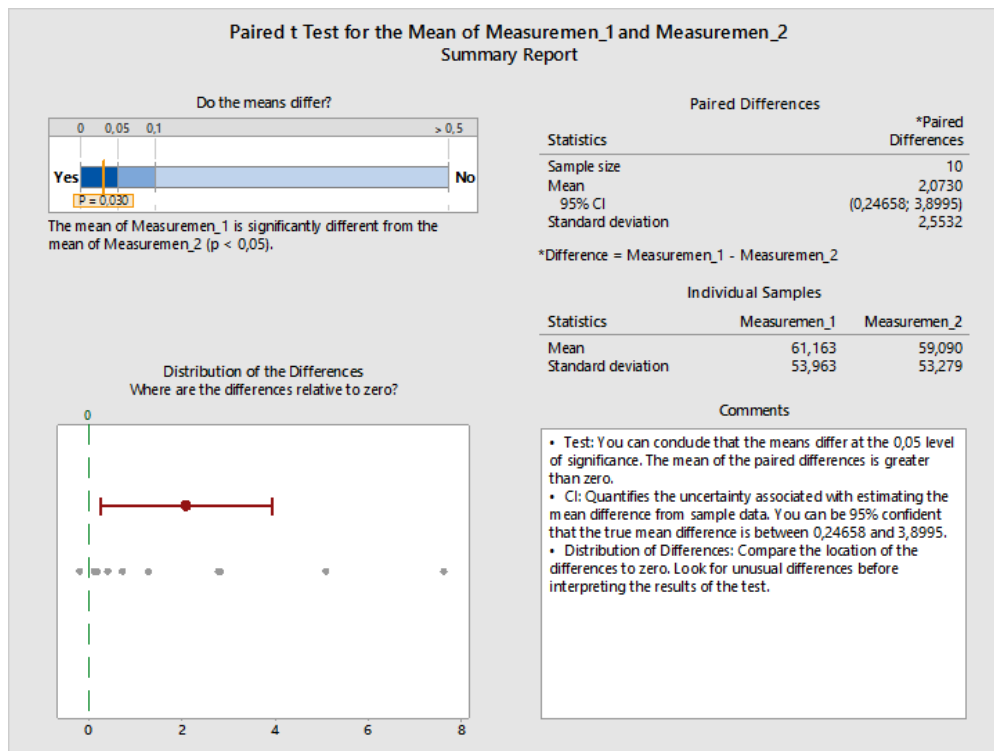


Figura L1 – Relatório do teste de hipóteses realizado

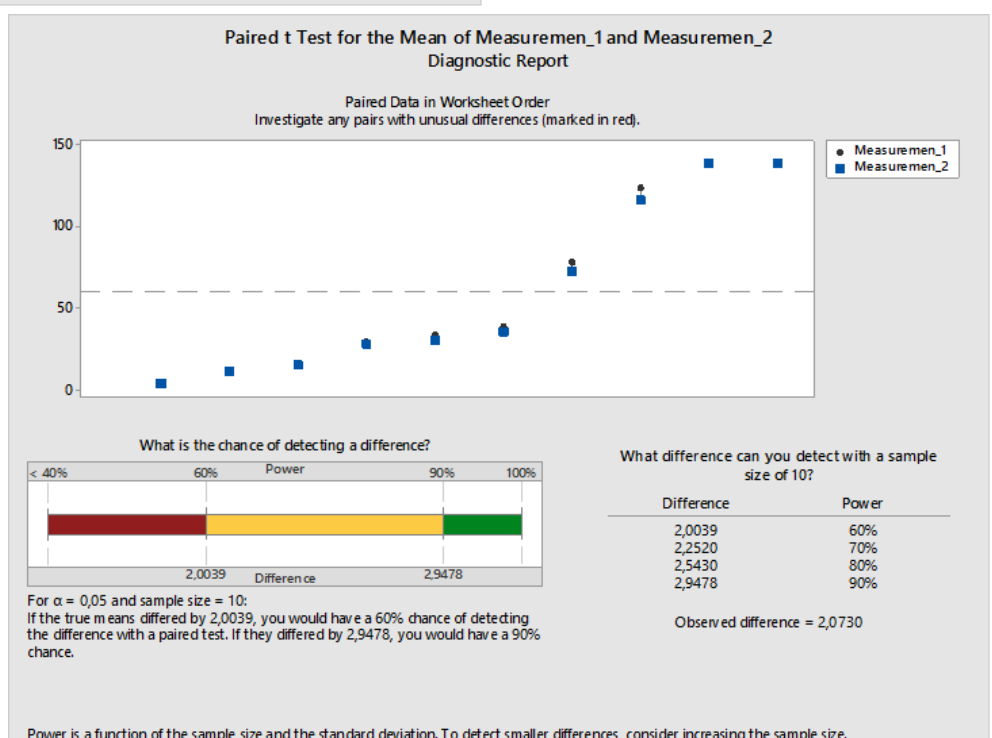
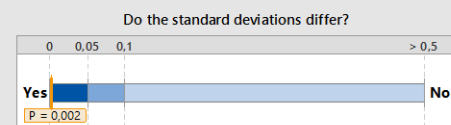


Figura L2 – Relatório do teste de hipóteses realizado

ANEXO M: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado ao desvio padrão das medições realizadas com ou sem peça de referência

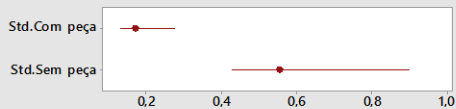
2-Sample Standard Deviation Test for Std.Com peça and Std.Sem peça Summary Report



The standard deviation of Std.Com peça is significantly different from Std.Sem peça ($p < 0.05$).

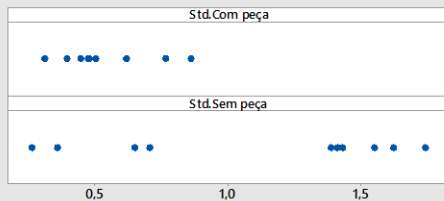
Standard Deviations Comparison Chart

Red indicates the standard deviations differ.



Distribution of Data

Compare the spread of the samples.



Statistics	Std.Com peça	Std.Sem peça
Sample size	10	10
Mean	0,52803	1,1095
Standard deviation	0,16986	0,55504
Individual 95% CI	(0,0934; 0,3842)	(0,3931; 0,9746)

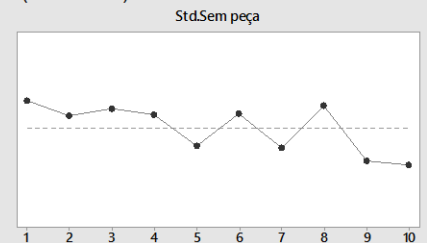
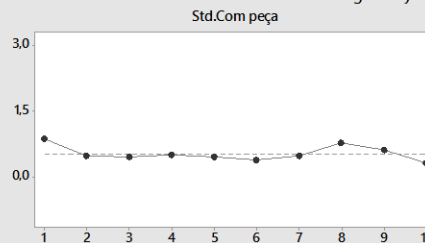
Comments

- Test: You can conclude that the standard deviations differ at the 0,05 level of significance.
- Comparison Chart: Red intervals indicate that the standard deviations differ. Consider the size of the difference to determine if it has practical implications.
- Distribution of Data: Compare the spread of the samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

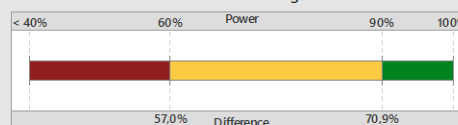
Figura M1 – Relatório do teste de hipóteses realizado

2-Sample Standard Deviation Test for Std.Com peça and Std.Sem peça Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



What is the chance of detecting a difference?



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 10:

If the true standard deviation of one sample were 57,0% smaller than the other, you would have a 60% chance of detecting the difference. If one were 70,9% smaller than the other, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 10?

% Difference	Power
57,0%	60%
61,2%	70%
65,6%	80%
70,9%	90%

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Figura M2 – Relatório do teste de hipóteses realizado

ANEXO N: Fotografias do Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo

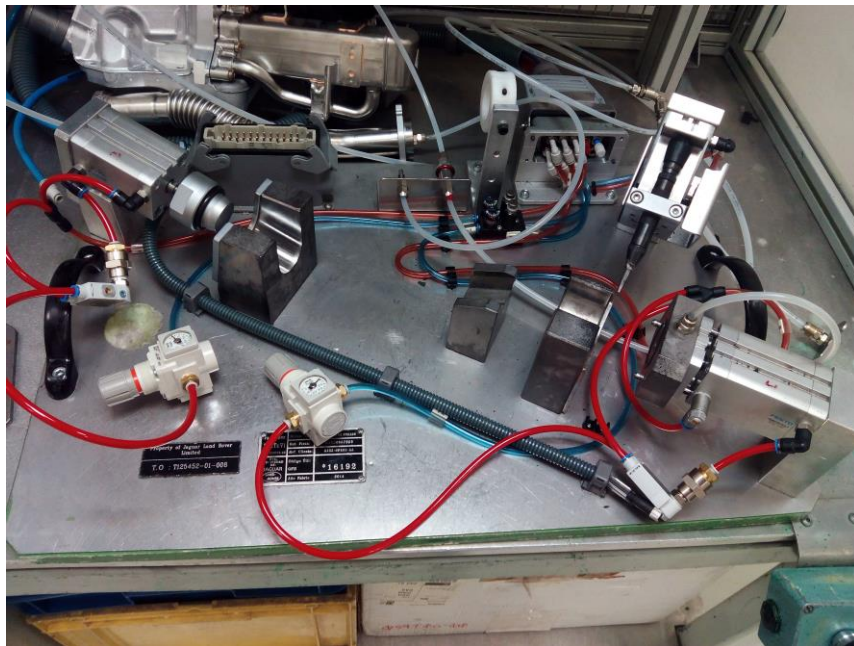


Figura N1 – Fotografia 1



Figura N2 – Fotografia 2

ANEXO O: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria dispositivo

Estudo relativo à média dos valores medidos

Para redução do modelo, deve-se rever a tabela ANOVA obtida e eliminar os termos com um “P-value” superior ao nível de significância especificado. Primeiramente elimina-se a combinação entre três fatores, de seguida a combinação entre 2 fatores e por fim, os efeitos principais. Os termos devem ser removidos individualmente. Em alternativa à tabela ANOVA, é também possível usar o gráfico pareto relativo ao efeito dos termos no que diz respeito à resposta em questão. Este gráfico pareto é usado para comparar a magnitude relativa e a significância estatística quer dos efeitos principais quer das interações. Nele é traçada, a vermelho, o erro de medição. Se o efeito do termo ultrapassar esse traço, quer dizer que tem influência na resposta e, como tal, não pode ser retirado do modelo. De seguida, será apresentada a redução do modelo usando os gráficos paretos e a tabela ANOVA apenas será apresentada para análise do modelo final.

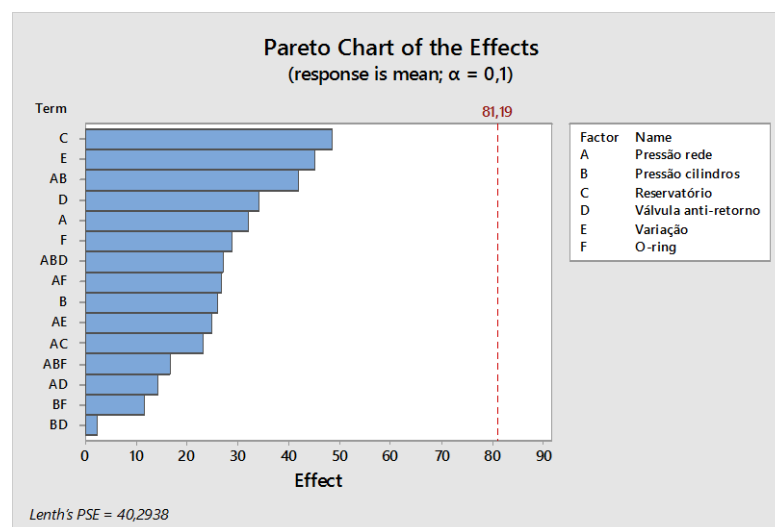


Figura O1 – Gráfico Pareto

Na figura O1, constatou-se que a interação dupla pressão cilindros e válvula anti-retorno é o termo que tem menor efeito no valor médio medido, contudo o modelo contempla a interação tripla entre pressão da rede, pressão cilindros e o-ring. Removeu-se este termo do modelo.

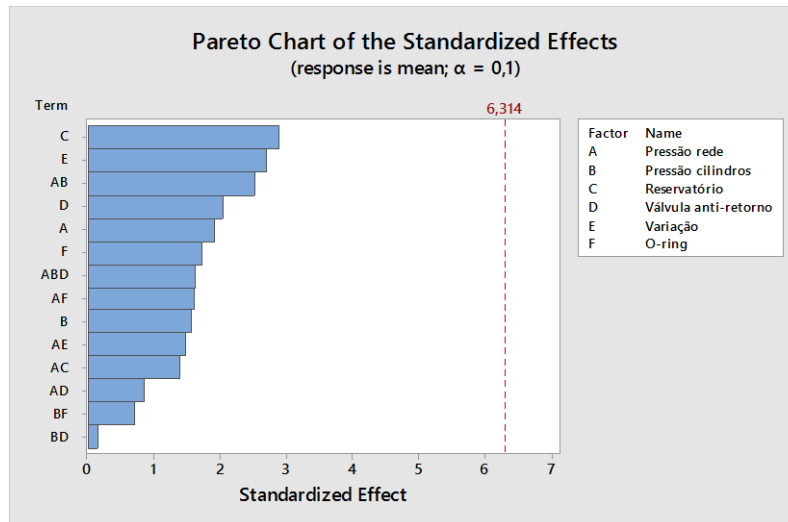


Figura O2 – Gráfico Pareto

Na figura O2, observou-se que a interação dupla pressão cilindros e válvula anti-retorno é o termo que tem menor efeito no valor médio medido, contudo o modelo contempla a interação tripla entre pressão rede, pressão cilindros e válvula anti-retorno. Removeu-se este termo do modelo.

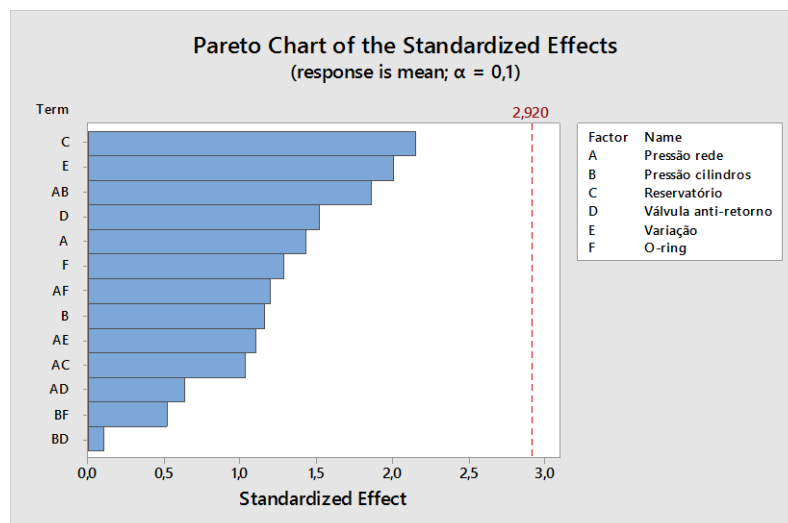


Figura O3- Gráfico Pareto

Na figura O3, constatou-se que a interação dupla entre pressão cilindros e válvula anti-retorno é o termo que tem menor efeito no valor médio medido. Removeu-se este termo do modelo.

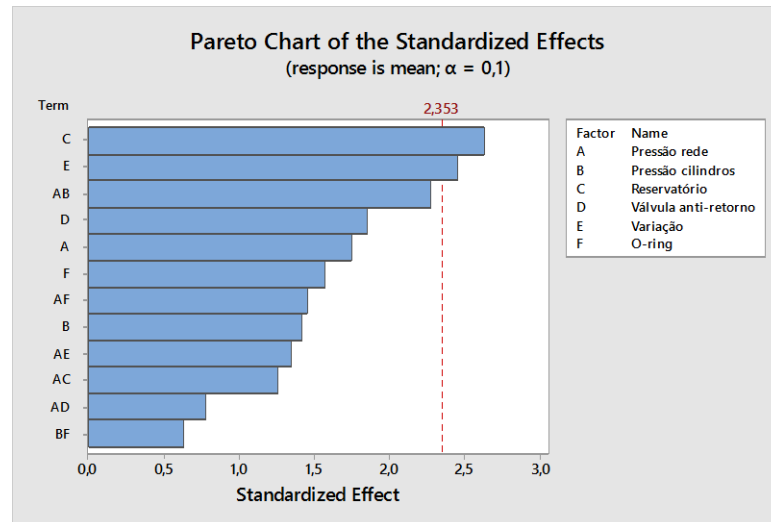


Figura O4 – Gráfico Pareto

Na figura O4, observou-se que a interação dupla entre pressão cilindros e o-ring é o termo que tem menor efeito no valor médio medido. Removeu-se este termo do modelo.

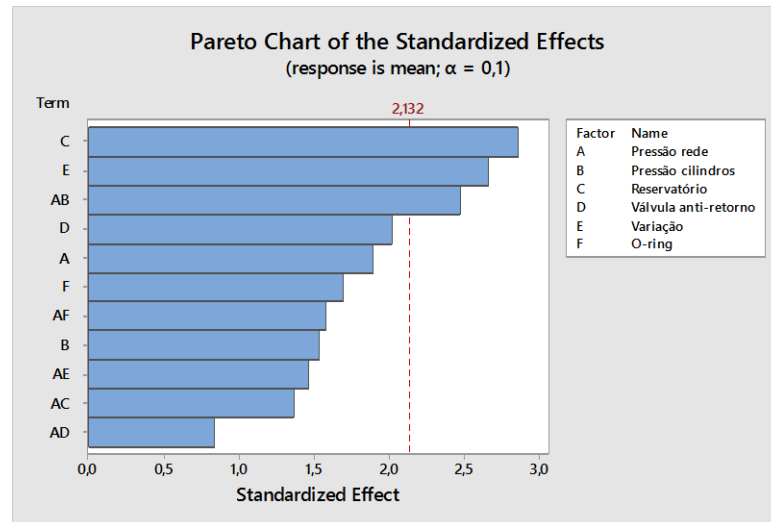


Figura O5 - Gráfico Pareto

Na figura O5, constatou-se que a interação dupla entre pressão rede e válvula anti-retorno é o termo que tem menor efeito no valor médio medido. Removeu-se este termo do modelo.

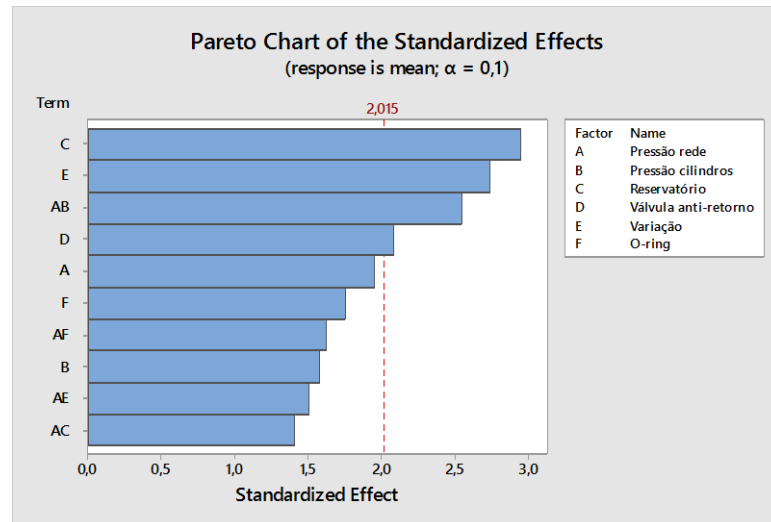


Figura O6 - Gráfico Pareto

Na figura O6, observou-se que a interação dupla entre pressão rede e reservatório é o termo que tem menor efeito no valor médio medido. Removeu-se este termo do modelo.

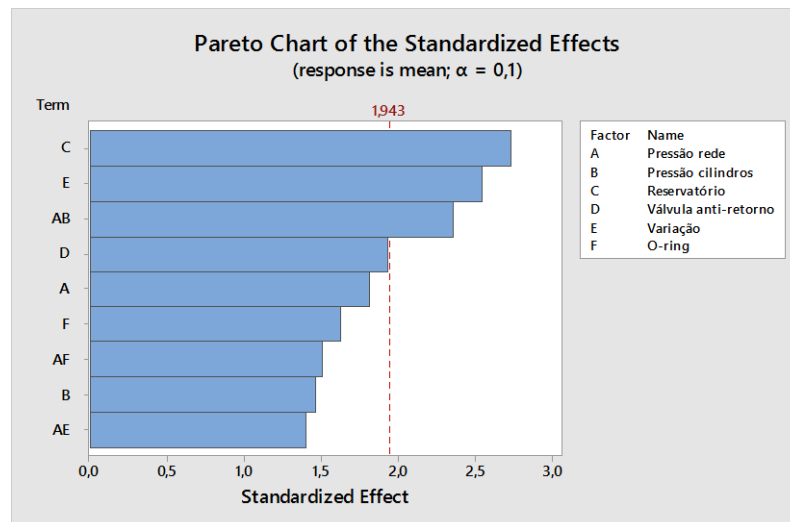


Figura O7 – Gráfico Pareto

Na figura O7, constatou-se que a interação dupla entre pressão rede e reservatório é o termo que tem menor efeito no valor médio medido. Removeu-se este termo do modelo.

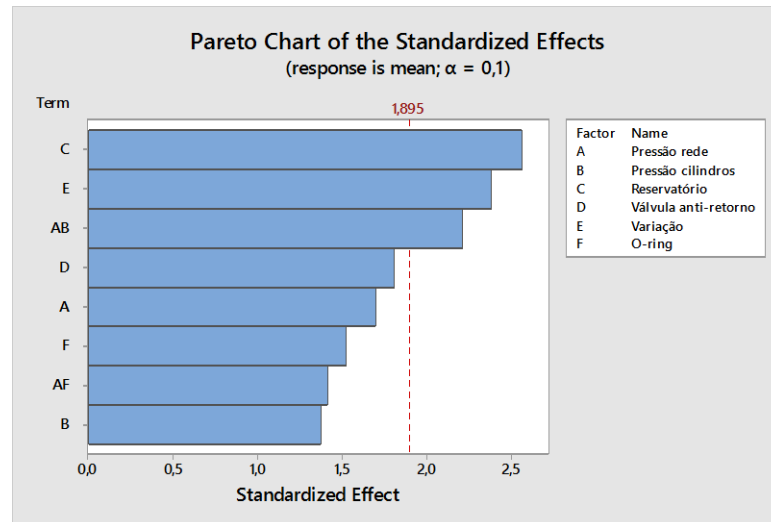


Figura O8 - Gráfico Pareto

Neste momento, se analisarmos a tabela ANOVA, o modelo explica 80,85% da variabilidade dos valores medidos. Se a interação dupla entre a pressão da rede e o-ring for retirada do modelo, este modelo passaria a ter um valor de “R-sq” inferior a 80%. Contudo, esse valor será de 75,35%. Deste modo, é favorável retirar este termo, visto que o “R-sq” não é muito prejudicado. Como tal, retirou-se este termo do modelo.

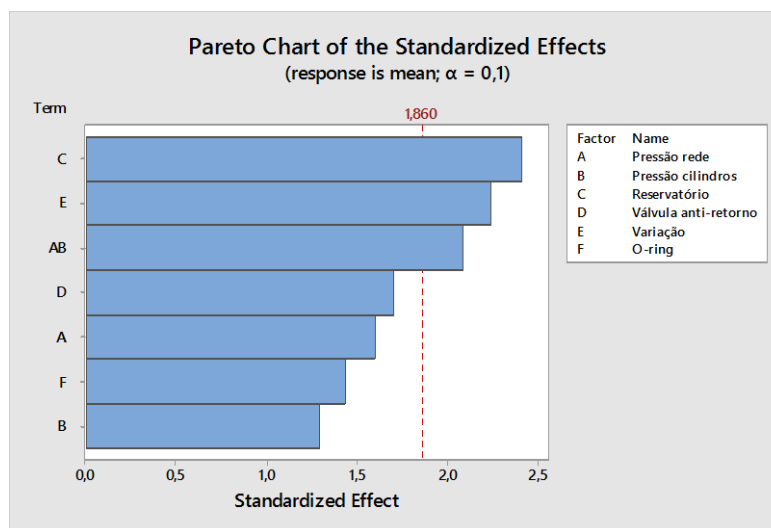


Figura O9 – Gráfico Pareto

O termo “pressão cilindro” não poderá ser retirado do modelo visto que a interação entre a pressão cilindros e pressão rede tem influência no valor médio medido. Se o termo “O-ring” for retirado do modelo, o “R-sq” baixará para 69%. A queda de percentagem deste indicador, já não justificará a eliminação do termo. Deste modo, atingiu-se o modelo final.

Factorial Regression: mean versus Pressão rede; Pressão cili; Reservatório; Válvula anti; ...
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	39569	5653	3,49	0,050
Linear	6	32515	5419	3,35	0,059
Pressão rede	1	4142	4142	2,56	0,148
Pressão cilindros	1	2720	2720	1,68	0,231
Reservatório	1	9433	9433	5,83	0,042
Válvula anti-retorno	1	4700	4700	2,90	0,127
Variação	1	8183	8183	5,06	0,055
O-ring	1	3336	3336	2,06	0,189
2-Way Interactions	1	7055	7055	4,36	0,070
Pressão rede*Pressão cilindros	1	7055	7055	4,36	0,070
Error	8	12945	1618		
Total	15	52515			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
40,2263	75,35%	53,78%	1,40%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		174,9	10,1	17,39	0,000	
Pressão rede		-32,2	16,1	-1,60	0,148	1,00
Pressão cilindros		26,1	13,0	10,1	0,231	1,00
Reservatório		48,6	24,3	10,1	2,41	0,042
Válvula anti-retorno		-34,3	-17,1	10,1	-1,70	0,127
Variação		-45,2	-22,6	10,1	-2,25	0,055
O-ring		-28,9	-14,4	10,1	-1,44	0,189
Pressão rede*Pressão cilindros		-42,0	-21,0	10,1	-2,09	0,070

Regression Equation in Uncoded Units
 mean = -1867 + 346 Pressão rede + 488 Pressão cilindros + 24,3 Reservatório
 - 17,1 Válvula anti-retorno - 90,5 Variação - 14,4 O-ring
 - 84,0 Pressão rede*Pressão cilindros

Figura O10 – Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, figura O11, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. Tanto no gráfico “Normal Probability Plot” como no Histograma, verificou-se que os resíduos se ajustam à normalidade. No gráfico “Versus Fits”, verificou-se que os resíduos não apresentam um padrão concreto, espalhando-se ao longo da gama de valores. Deste modo, não há evidência de existência de variância não constante, de falta de termos e de valores extremos (“outliers”). No gráfico “Versus Order”, verificou-se que os resíduos não seguem nenhuma tendência, espalhando-se em torno da linha central. Podemos afirmar que os resíduos são independentes.

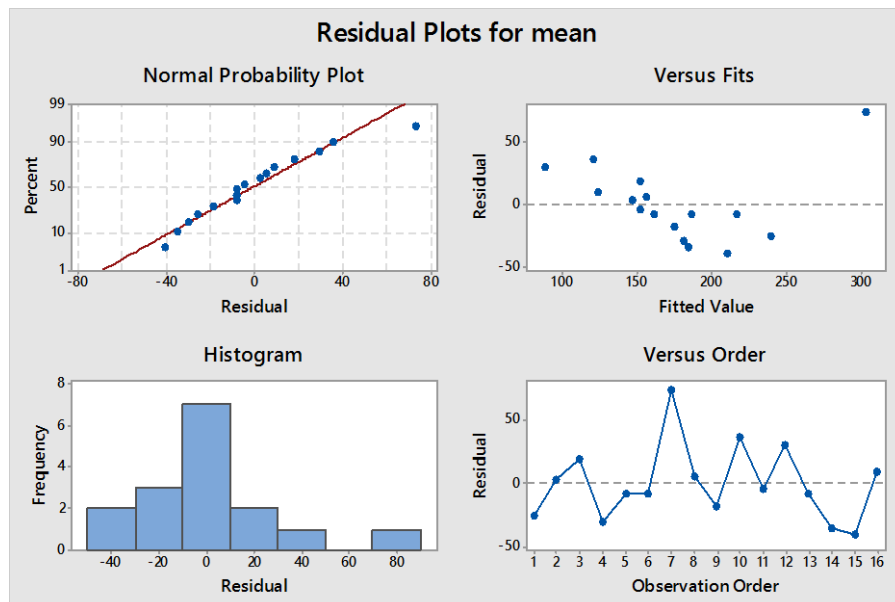


Figura O11 – Gráficos respeitantes aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo final, no valor médio medido. Através da figura O12, constatou-se que a presença do reservatório de ar não é favorável. Também se concluiu que se não existir qualquer variação da pressão da rede durante o tempo de medição, o valor médio medido é inferior, o que faz crer que é necessário possuir uma rede de ar comprimido que não sofra oscilações, mantendo sempre a pressão constante. A pressão da rede deverá ser de 6 bar e a pressão dos cilindros de 4 bar. A presença

da válvula anti-retorno também é favorável. Por último, o o-ring de dureza 26 shore é mais favorável que o standard.

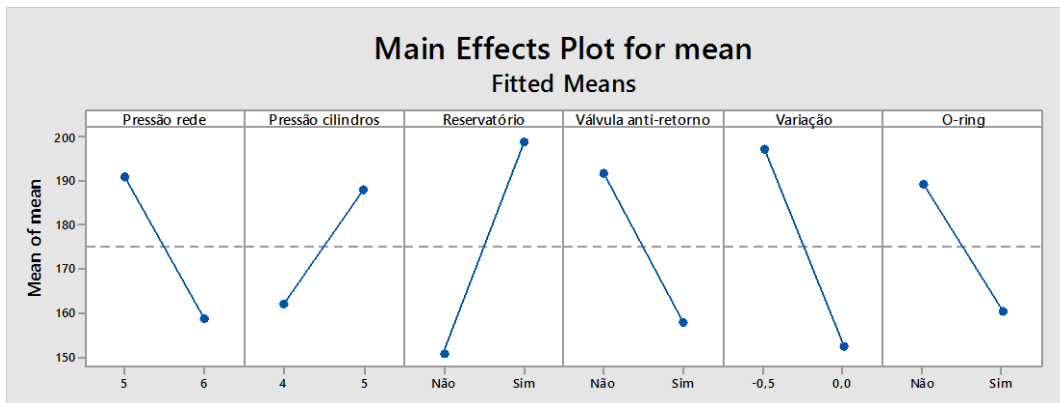


Figura O12 – Efeitos dos termos individuais do modelo no valor médio medido

Quanto à interação entre a pressão dos cilindros e a pressão da rede, na figura O13 verificou-se que o valor médio medido é menor quando a pressão dos cilindros é de 5 bar e a pressão da rede 6 bar. Se a pressão da rede for de 5 bar, a pressão dos cilindros deve ser de 4 bar para que se atinja um valor médio medido menor.

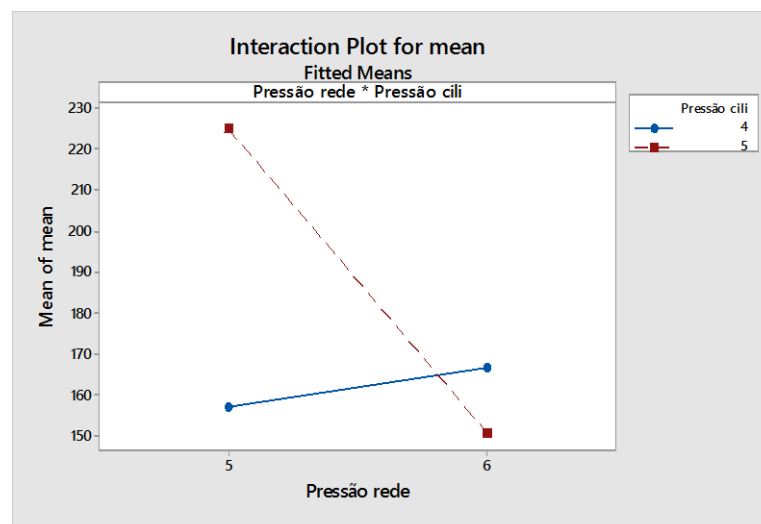


Figura O13- Efeito da interação entre os termos pressão rede e pressão cilindros no valor médio medido

Estudo relativo ao desvio padrão dos valores medidos

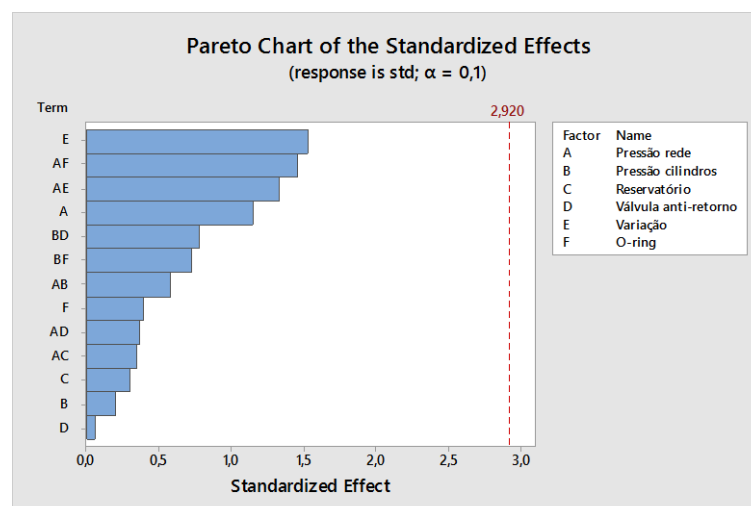


Figura O14 – Gráfico Pareto

Na figura O14, constatou-se que o termo válvula anti-retorno é o que tem menor efeito no desvio padrão do valor medido, contudo, primeiro terão de se eliminar as interações duplas. Removeu-se a interação dupla pressão rede e reservatório do modelo.

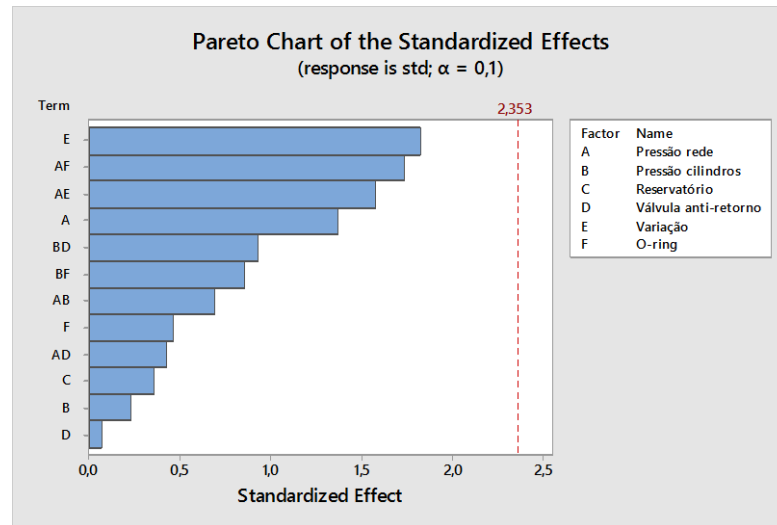


Figura O15 – Gráfico Pareto

Na figura O15, observou-se que o termo válvula anti-retorno é o que tem menor efeito no desvio padrão do valor medido, contudo, primeiro terão de eliminar as interações duplas. Removeu-se a interação dupla pressão rede e válvula anti-retorno do modelo.

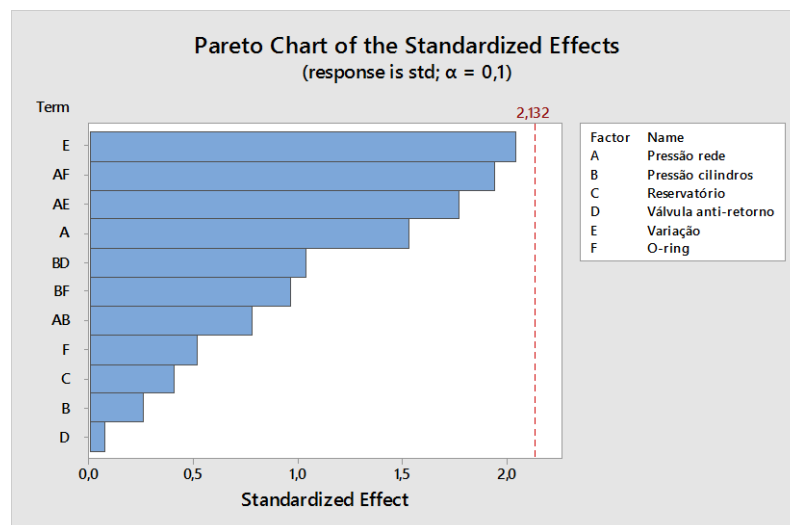


Figura O16 - Gráfico Pareto

Neste momento, se analisarmos a tabela ANOVA, o modelo explica 80,54% da variabilidade dos valores medidos. Se a interação dupla entre a pressão da rede e a pressão dos cilindros for retirada do modelo, este passaria a ter um valor de “R-sq” inferior a 80%. Contudo, esse valor será de 77,60%. Deste modo, é favorável retirar este termo, visto que o “R-sq” não é muito prejudicado. Retirou-se este termo do modelo.

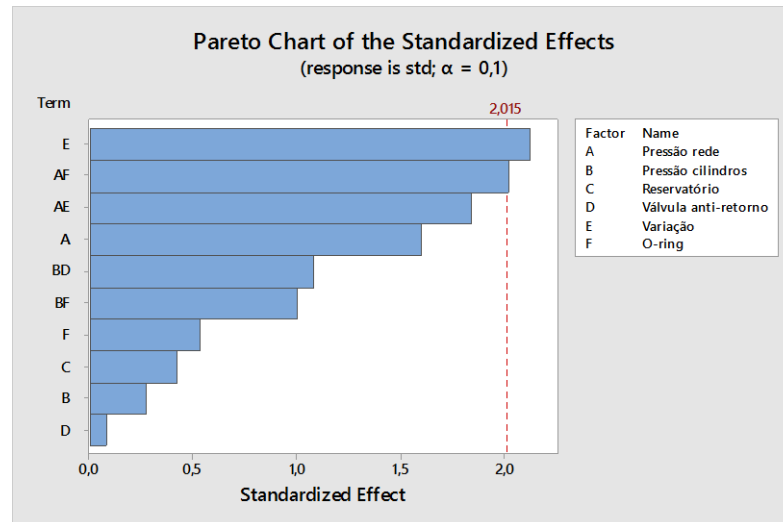


Figura O17 – Gráfico Pareto

Se a interação dupla entre a pressão cilindros e o o-ring for retirado do modelo, o “R-sq” baixará para 73,09%. A queda de percentagem deste indicador, já não justificará a eliminação do termo. Deste modo, atingiu-se o modelo final.

Factorial Regression: std versus Pressão rede; Pressão cili; Reservatório; Válvula anti; ... Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	10	757,527	75,753	1,73	0,283	
Linear	6	334,056	55,676	1,27	0,405	
Pressão rede	1	112,015	112,015	2,56	0,170	
Pressão cilindros	1	3,203	3,203	0,07	0,798	
Reservatório	1	7,713	7,713	0,18	0,692	
Válvula anti-retorno	1	0,258	0,258	0,01	0,942	
Variação	1	198,272	198,272	4,53	0,087	
O-ring	1	12,594	12,594	0,29	0,615	
2-Way Interactions	4	423,471	105,868	2,42	0,179	
Pressão rede*Variação	1	148,997	148,997	3,41	0,124	
Pressão rede*O-ring	1	179,151	179,151	4,10	0,099	
Pressão cilindros*Válvula anti-retorno	1	51,329	51,329	1,17	0,328	
Pressão cilindros*O-ring	1	43,993	43,993	1,01	0,362	
Error	5	218,715	43,743			
Total	15	976,242				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
6,61385	77,60%	32,79%	0,00%

Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		9,59	1,65	5,80	0,002	
Pressão rede		-5,29	2,65	-1,60	0,170	1,00
Pressão cilindros		-0,89	0,45	-0,27	0,798	1,00
Reservatório		1,39	0,69	0,42	0,692	1,00
Válvula anti-retorno		-0,25	0,13	-0,08	0,942	1,00
Variação		-7,04	3,52	-2,13	0,087	1,00
O-ring		-1,77	0,89	-0,54	0,615	1,00
Pressão rede*Variação		6,10	3,05	1,85	0,124	1,00
Pressão rede*O-ring		6,69	3,35	2,02	0,099	1,00
Pressão cilindros*Válvula anti-retorno		-3,58	1,79	-1,08	0,328	1,00
Pressão cilindros*O-ring		-3,32	1,66	-1,00	0,362	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{std} = 5,6 + 0,81 \text{ Pressão rede} - 0,89 \text{ Pressão cilindros} + 0,69 \text{ Reservatório} + 16,0 \text{ Válvula anti-retorno} - 148,4 \text{ Variação} - 22,8 \text{ O-ring} + 24,4 \text{ Pressão rede*Variação} + 6,69 \text{ Pressão rede*O-ring} - 3,58 \text{ Pressão cilindros*Válvula anti-retorno} - 3,32 \text{ Pressão cilindros*O-ring}$$

Figura O18 – Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, figura O19, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. Quanto à normalidade não se pode afirmar que os resíduos se ajustam à normalidade, contudo isso poderá dever-se à amostra apenas ser de 16 pontos. Através do Histograma, poder-se-á afirmar que há existência de 2 grandes grupos de dados. No gráfico “Versus Fits”, verificou-se que os resíduos não apresentam um padrão concreto, espalhando-se ao longo da gama de valores. Deste modo, não há evidência de existência de variância não constante, de falta de termos e de valores extremos (“outliers”). No gráfico “Versus Order”, verificou-se que os resíduos não seguem nenhuma tendência, espalhando-se em torno da linha central. Podemos afirmar que os resíduos são independentes.

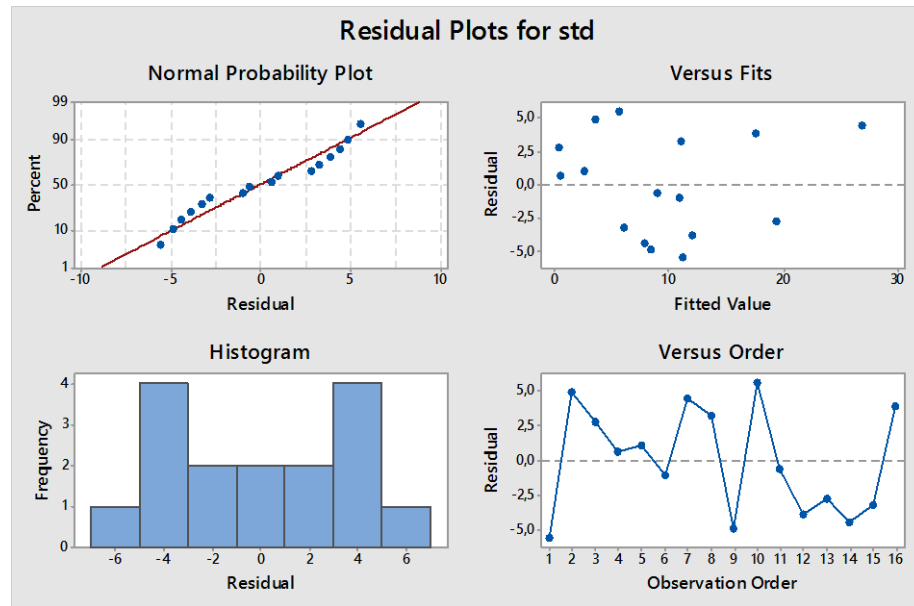


Figura O19 - Gráfico respeitante aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo final, no desvio padrão do valor medido. Na figura O20, constatou-se que a presença do reservatório de ar não é favorável para a variabilidade dos valores medidos. A pressão da rede deve ser de 6 bar e a pressão dos cilindros de 5 bar para que a variabilidade seja a menor. A presença da válvula anti-retorno favorece esta resposta em estudo, mas sem grandes diferenças relativamente à falta da sua presença. A presença do o-ring com dureza de 26 shore também favorece o desvio padrão dos valores medidos. Por último, concluiu-se que se não existir qualquer variação da pressão da rede durante o tempo de medição, a variabilidade dos valores medidos é inferior, o que faz crer que é necessário possuir uma rede de ar comprimido que não sofra oscilações, mantendo sempre a pressão constante.

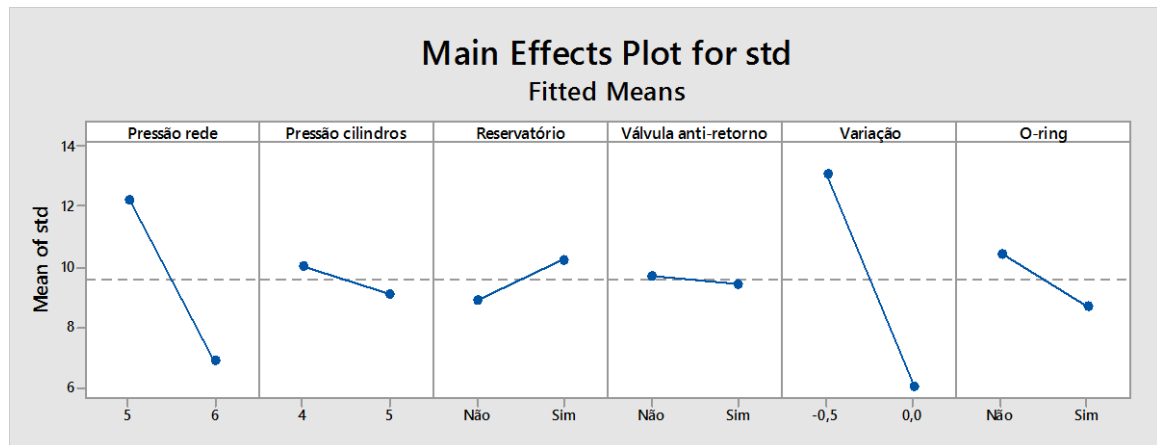


Figura O20 - Efeito dos termos individuais presentes no modelo no desvio padrão dos valores medidos

Quanto às interações duplas presentes no modelo, na figura O21 estão representadas as configurações de cada interação dupla que levam à menor variabilidade no valor medido.

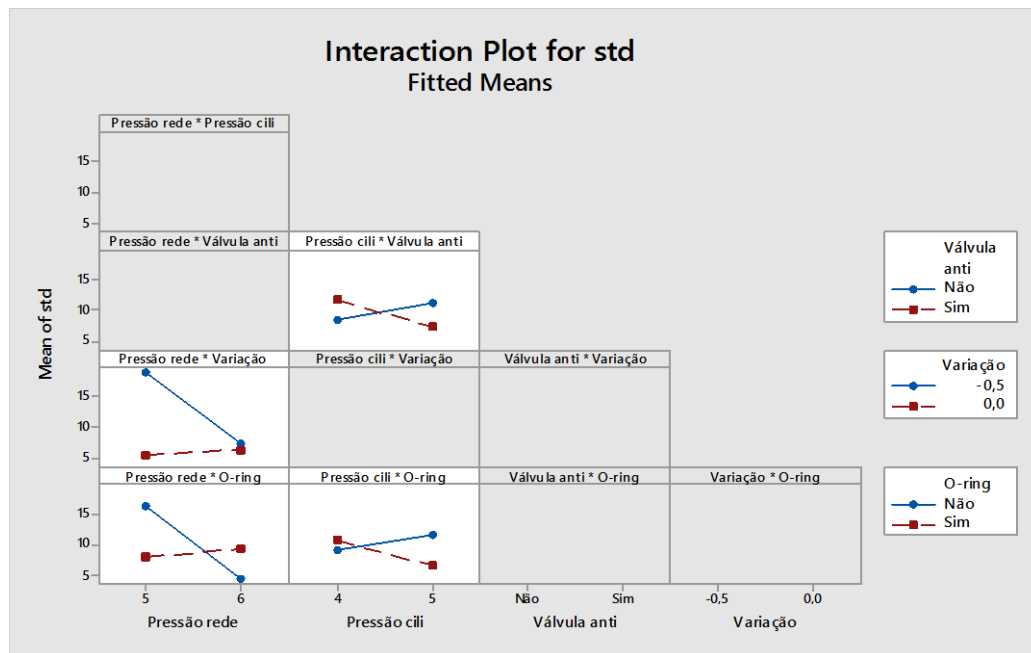


Figura O21 – Efeitos das interações duplas presentes no modelo no desvio padrão dos valores medidos

ANEXO P: Fotografias do Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material

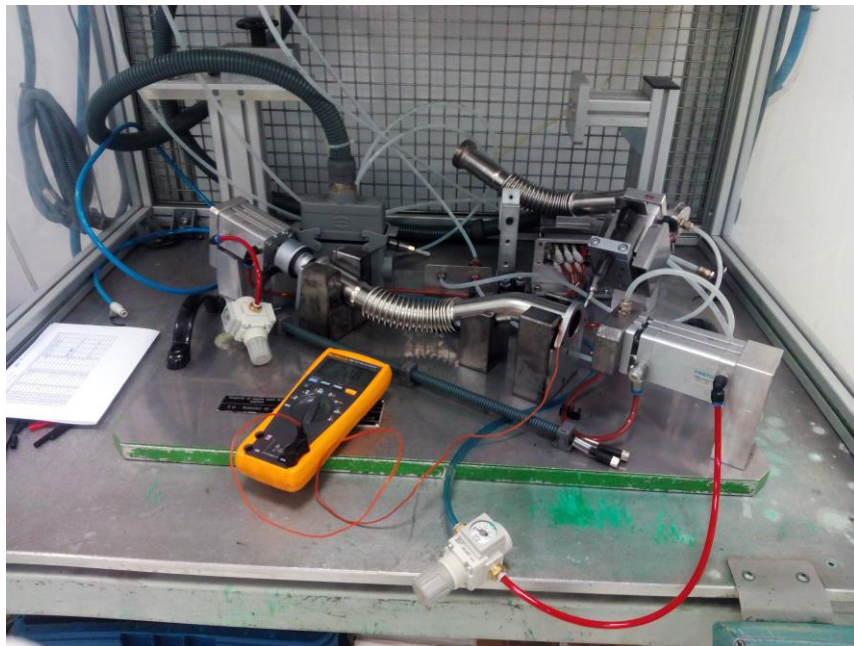


Figura P1 – Fotografia 1



Figura P2- Fotografia 2

ANEXO Q: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria meio ambiente e material

Estudo relativo à média dos valores medidos

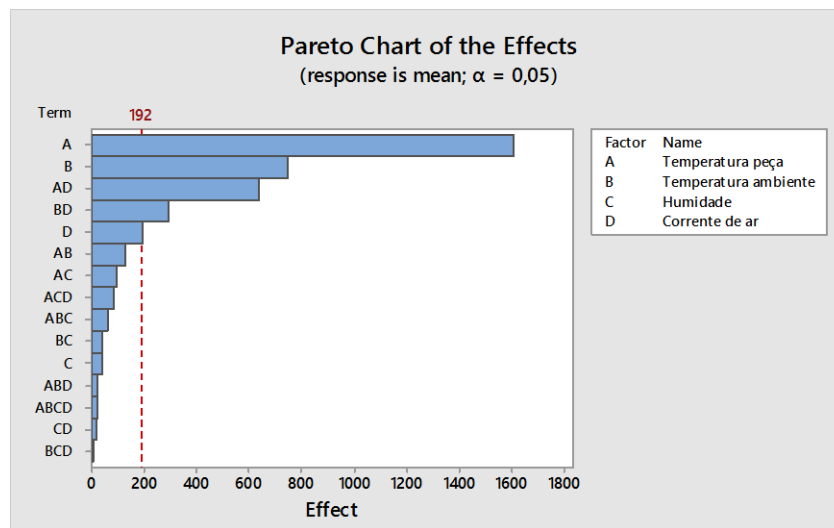


Figura Q1 - Gráfico Pareto

Na figura Q1, observou-se que a interação tripla entre temperatura ambiente, humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há uma interação quádrupla a retirar do modelo. Retirou-se a interação quádrupla entre temperatura peça, temperatura ambiente, humidade e corrente de ar do modelo.

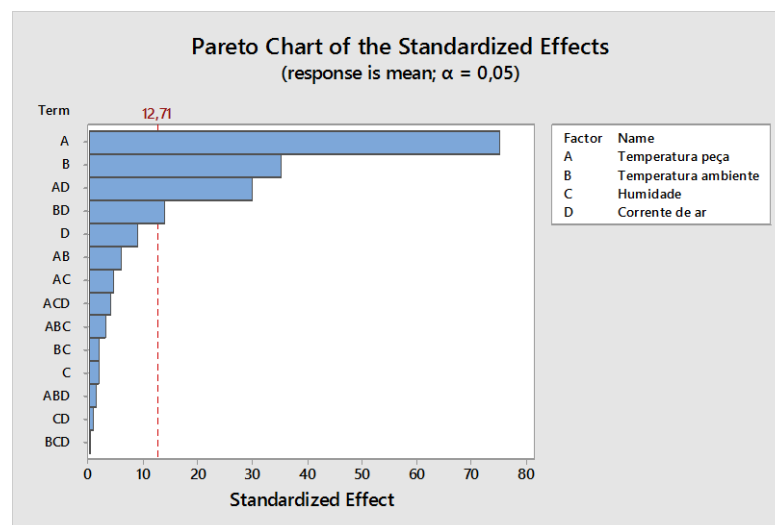


Figura Q2 - Gráfico Pareto

Na figura Q2, constatou-se que a interação tripla entre temperatura ambiente, humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos. Retirou-se este termo do modelo.

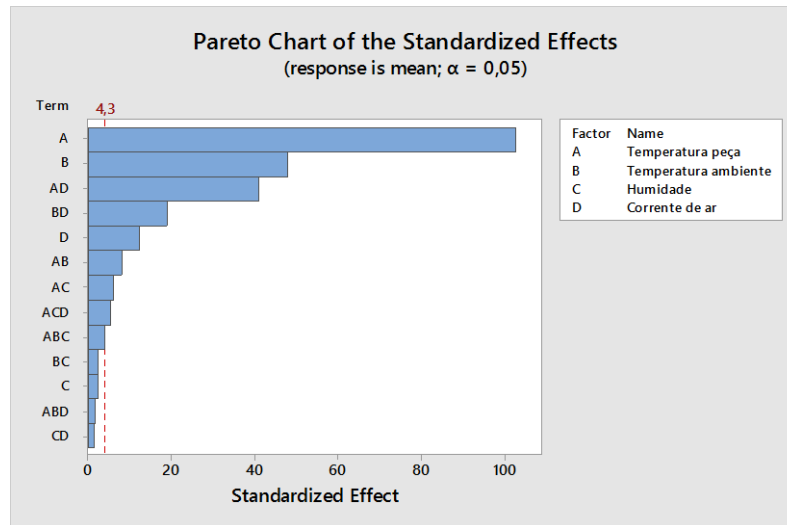


Figura Q3 - Gráfico Pareto

Na figura Q3, observou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há uma interação tripla a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre temperatura peça, temperatura ambiente e corrente de ar do modelo.

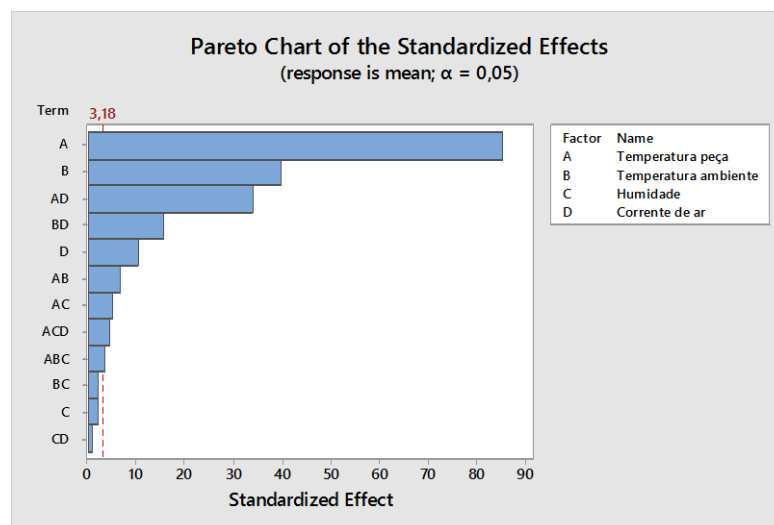


Figura Q4 - Gráfico Pareto

Na figura Q4, constatou-se que os únicos termos que poderiam ser retirados do modelo seriam a humidade, a interação dupla entre a humidade e a corrente de ar e a interação dupla entre a temperatura ambiente e a humidade. Contudo, estes termos não podem ser eliminados visto que há interações triplas com efeitos significativos na média dos valores medidos. Atingiu-se o modelo final.

Factorial Regression: mean versus Temperatura ; Temperatura ; Humidade; Corrente de						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	12	14807246	1233937	874,90	0,000	
Linear	4	12686926	3171732	2248,85	0,000	
Temperatura peça	1	10298884	10298884	7302,21	0,000	
Temperatura ambiente	1	2236520	2236520	1585,76	0,000	
Humidade	1	5311	5311	3,77	0,148	
Corrente de ar	1	146211	146211	103,67	0,002	
2-Way Interactions	6	2077301	346217	245,48	0,000	
Temperatura peça*Temperatura ambiente	1	62982	62982	44,66	0,007	
Temperatura peça*Humidade	1	35584	35584	25,23	0,015	
Temperatura peça*Corrente de ar	1	1628144	1628144	1154,40	0,000	
Temperatura ambiente*Humidade	1	5666	5666	4,02	0,139	
Temperatura ambiente*Corrente de ar	1	343601	343601	243,62	0,001	
Humidade*Corrente de ar	1	1323	1323	0,94	0,404	
3-Way Interactions	2	43019	21509	15,25	0,027	
Temperatura peça*Temperatura ambiente*Humidade	1	15317	15317	10,86	0,046	
Temperatura peça*Humidade*Corrente de ar	1	27701	27701	19,64	0,021	
Error	3	4231	1410			
Total	15	14811477				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(Adj)	R-sq(Pred)
37,5558	99,97%	99,86%	99,19%

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	
Constant		265,62	9,39	28,29	0,000	
Temperatura peça	1604,59	802,30	9,39	85,45	0,000	
Temperatura ambiente	-747,75	-373,87	9,39	-39,82	0,000	
Humidade	36,44	18,22	9,39	1,94	0,148	
Corrente de ar	191,19	95,59	9,39	10,18	0,002	
Temperatura peça*Temperatura ambiente	-125,48	-62,74	9,39	-6,68	0,007	
Temperatura peça*Humidade	-94,32	-47,16	9,39	-5,02	0,015	
Temperatura peça*Corrente de ar	637,99	319,00	9,39	33,98	0,000	
Temperatura ambiente*Humidade	-37,64	-18,82	9,39	-2,00	0,139	
Temperatura ambiente*Corrente de ar	-293,09	-146,54	9,39	-15,61	0,001	
Humidade*Corrente de ar	18,19	9,09	9,39	0,97	0,404	
Temperatura peça*Temperatura ambiente*Humidade	-61,88	-30,94	9,39	-3,30	0,046	
Temperatura peça*Humidade*Corrente de ar	-83,22	-41,61	9,39	-4,43	0,021	

VIF						
Term						
Constant						
Temperatura peça	1,00					
Temperatura ambiente	1,00					
Humidade	1,00					
Corrente de ar	1,00					
Temperatura peça*Temperatura ambiente	1,00					
Temperatura peça*Humidade	1,00					
Temperatura peça*Corrente de ar	1,00					
Temperatura ambiente*Humidade	1,00					
Temperatura ambiente*Corrente de ar	1,00					
Humidade*Corrente de ar	1,00					
Temperatura peça*Temperatura ambiente*Humidade	1,00					
Temperatura peça*Humidade*Corrente de ar	1,00					

Regression Equation in Uncoded Units

mean = 165 + 60,1 Temperatura peça - 157,6 Temperatura ambiente - 31,8 Humidade
 - 1052 Corrente de ar + 4,19 Temperatura peça*Temperatura ambiente
 + 1,991 Temperatura peça*Humidade + 81,59 Temperatura peça*Corrente de ar
 + 2,293 Temperatura ambiente*Humidade - 34,48 Temperatura ambiente*Corrente de ar
 + 17,15 Humidade*Corrente de ar
 - 0,1224 Temperatura peça*Temperatura ambiente*Humidade
 - 0,699 Temperatura peça*Humidade*Corrente de ar

Figura Q5 - Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, apresentados na figura Q6, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. Tanto no gráfico “Normal Probability Plot” como no Histograma, verificou-se que os resíduos se ajustam à normalidade. No gráfico “Versus Fits”, verificou-se que os resíduos não apresentam um padrão concreto, espalhando-se ao longo da gama de valores. Deste modo, não há evidência de existência de variância não constante, de falta de termos e de valores extremos (“outliers”). No gráfico “Versus Order”, verificou-se que os resíduos não seguem nenhuma tendência, espalhando-se em torno da linha central. Podemos afirmar que os resíduos são independentes.

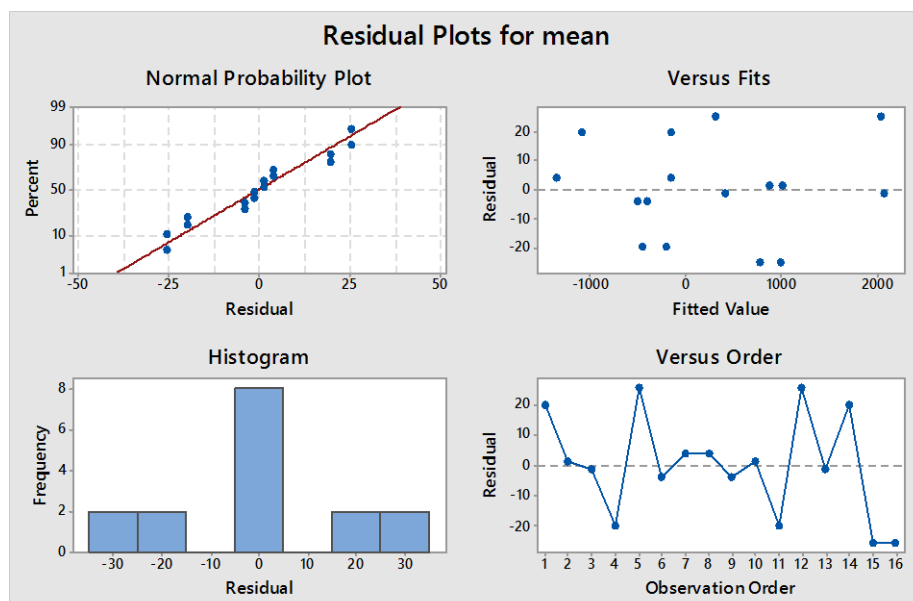


Figura Q6 -Gráficos respeitantes aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo, no valor médio medido. Através da figura Q7, verificou-se que à medida que a temperatura da peça aumenta, o valor médio medido também aumenta e à medida que a temperatura ambiente aumenta, o valor médio medido diminui. Quanto à humidade, as diferenças não são significativas entre os níveis definidos, mas verificou-se que com uma humidade de 60% o valor médio medido é ligeiramente menor. Por último, a presença de corrente de ar aumenta o valor médio medido.

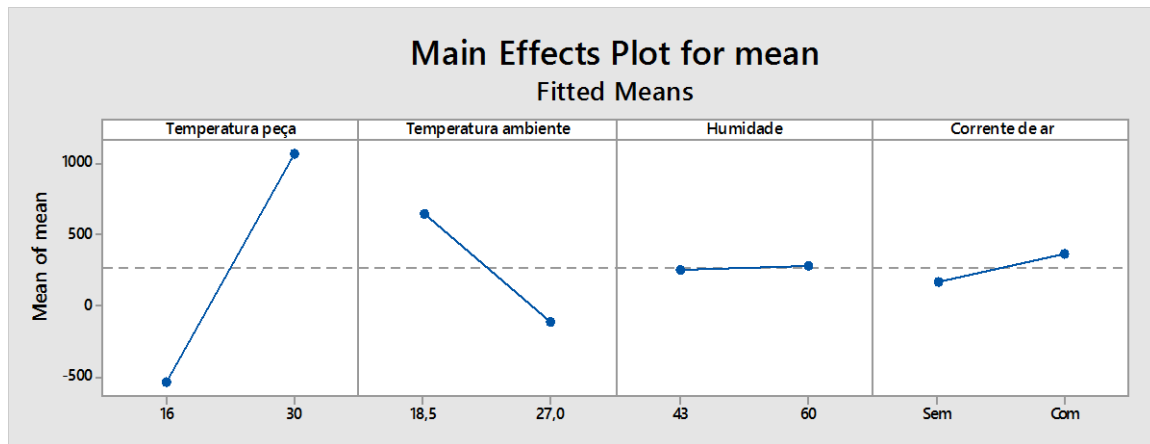


Figura Q7 - Efeito dos termos individuais presentes no modelo na média dos valores medidos

Quanto às interações duplas presentes no modelo, na figura Q8 estão representadas as configurações de cada interação dupla que levam a um menor valor médio medido.

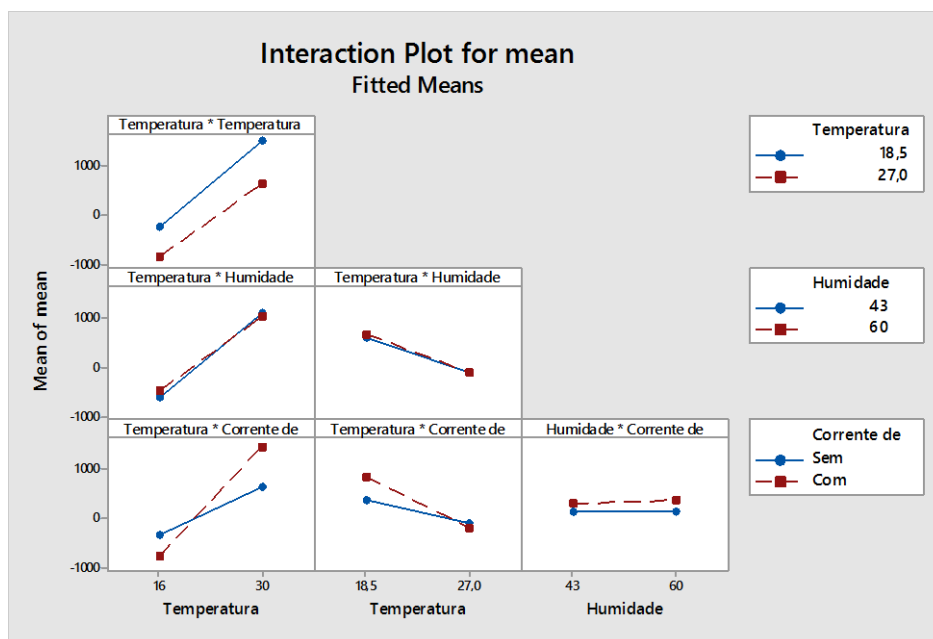


Figura Q8 – Efeito das interações duplas presentes no modelo na média dos valores medidos

Estudo relativo ao desvio padrão dos valores medidos

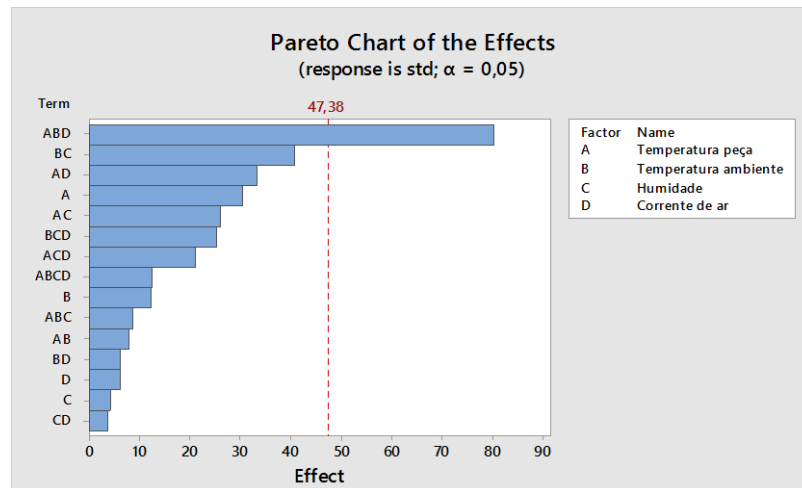


Figura Q9 – Gráfico Pareto

Na figura Q9, observou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há uma interação quádrupla a retirar do modelo. Retirou-se a interação quádrupla entre temperatura peça, temperatura ambiente, humidade e corrente de ar do modelo.

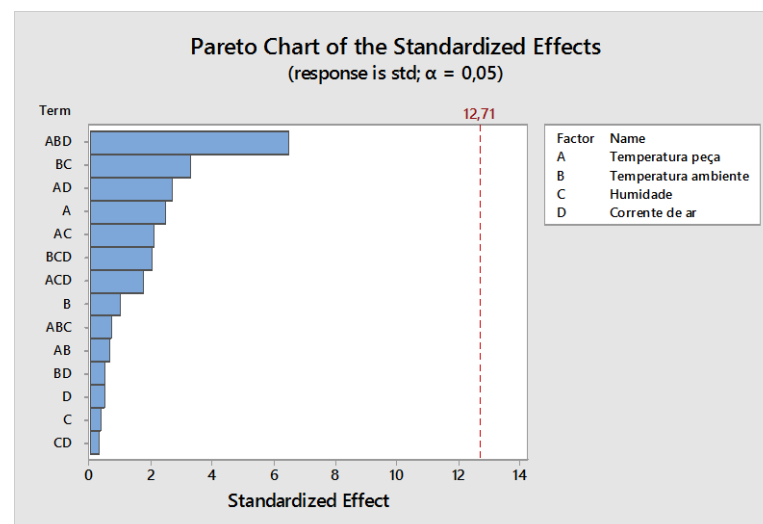


Figura Q10 – Gráfico Pareto

Na figura Q10, constatou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre temperatura peça, temperatura ambiente e humidade do modelo.

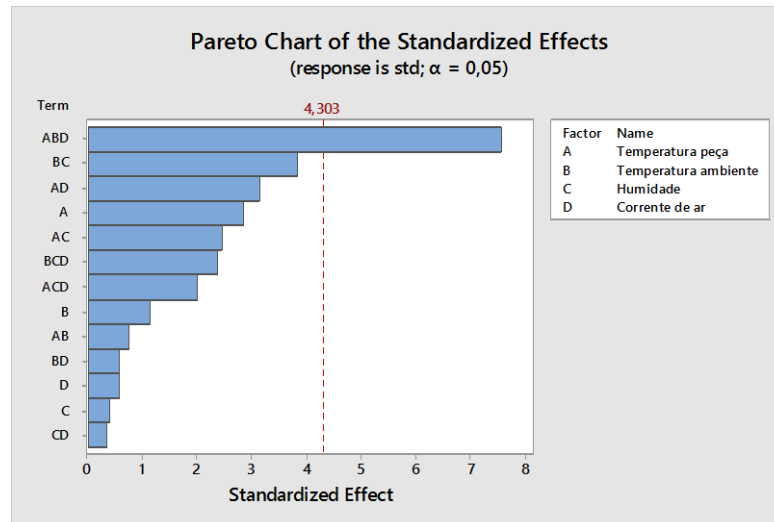


Figura Q11 - Gráfico Pareto

Na figura Q11, observou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre temperatura peça, humidade e corrente de ar do modelo.

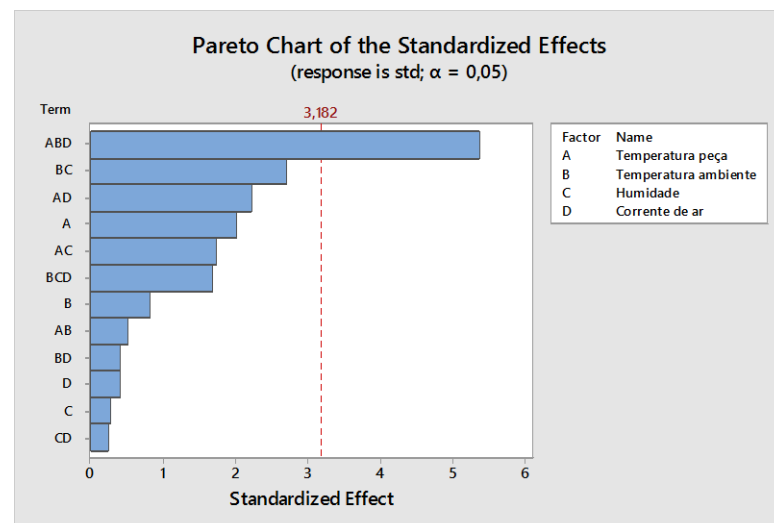


Figura Q12 - Gráfico Pareto

Na figura Q12, constatou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre temperatura ambiente, humidade e corrente de ar do modelo.

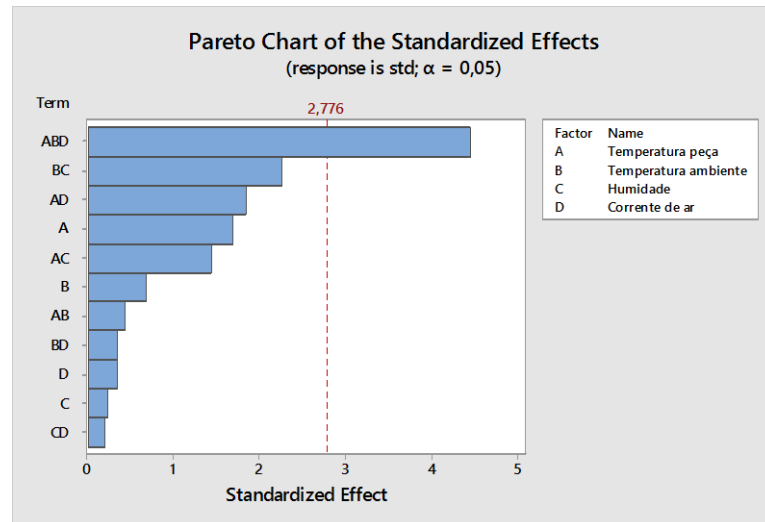


Figura Q13 - Gráfico Pareto

Na figura Q13, observou-se que a interação dupla entre humidade e corrente de ar é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos. Retirou-se este termo do modelo.

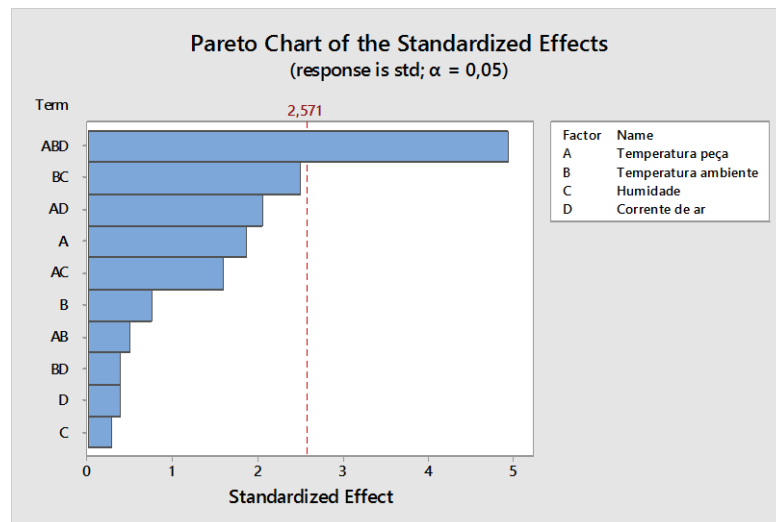


Figura Q14 - Gráfico Pareto

Na figura Q14 constatou-se que o termo humidade é o que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há interações duplas a retirar do modelo. Deste modo, retirou-se a interação dupla entre temperatura peça e humidade. É de assinalar que a interação dupla entre temperatura ambiente e corrente de ar, assim como a interação dupla entre a temperatura peça e temperatura ambiente não se podem retirar do modelo visto que estão contidas na interação tripla entre temperatura peça, temperatura ambiente e corrente de ar, que tem influência no valor médio medido.

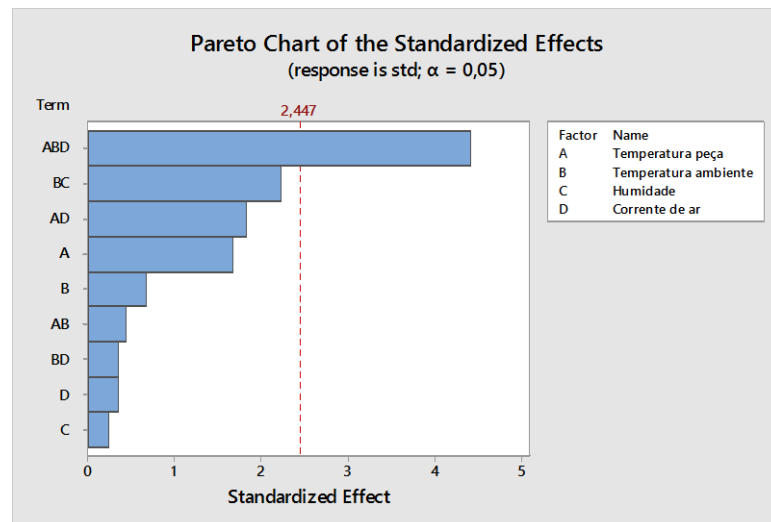


Figura Q15 - Gráfico Pareto

Se a interação dupla entre a temperatura ambiente e a humidade fosse retirada do modelo, este modelo passaria a ter um valor de “R-sq” de 70,69%. A queda de percentagem deste indicador, já não justificará a eliminação do termo. Atingiu-se o modelo final.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-value
Model	9	41738,0	4637,6	3,49	0,071
Linear	4	4492,9	1123,2	0,84	0,545
Temperatura peça	1	3678,9	3678,9	2,77	0,147
Temperatura ambiente	1	593,8	593,8	0,45	0,529
Humidade	1	72,9	72,9	0,05	0,823
Corrente de ar	1	147,3	147,3	0,11	0,751
2-Way Interactions	4	11413,5	2853,4	2,15	0,193
Temperatura peça*Temperatura ambiente	1	248,5	248,5	0,19	0,681
Temperatura peça*Corrente de ar	1	4420,5	4420,5	3,32	0,118
Temperatura ambiente*Humidade	1	6593,3	6593,3	4,96	0,068
Temperatura ambiente*Corrente de ar	1	151,2	151,2	0,11	0,747
3-Way Interactions	1	25831,6	25831,6	19,43	0,005
Temperatura peça*Temperatura ambiente*Corrente de ar	1	25831,6	25831,6	19,43	0,005
Error	6	7976,8	1329,5		
Total	15	49714,8			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
36,4620	83,95%	59,89%	0,00%

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-value	VIF
Constant		72,10	9,12	7,91	0,000	1,00
Temperatura peça		-30,33	15,16	-1,66	0,147	1,00
Temperatura ambiente		-12,18	6,09	-0,67	0,529	1,00
Humidade		-4,27	2,14	-0,23	0,823	1,00
Corrente de ar		-6,07	3,03	-0,33	0,751	1,00
Temperatura peça*Temperatura ambiente		-7,88	3,94	-0,43	0,681	1,00
Temperatura peça*Corrente de ar		-33,24	16,62	-1,82	0,118	1,00
Temperatura ambiente*Humidade		40,60	20,30	2,23	0,068	1,00
Temperatura ambiente*Corrente de ar		6,15	3,07	0,34	0,747	1,00
Temperatura peça*Temperatura ambiente*Corrente de ar		80,36	40,18	4,41	0,005	1,00

std	=	757	+	0,85	Temperatura peça	-	27,3	Temperatura ambiente	-	13,04	Humidade	+	742	Corrente de ar	-	0,132	Temperatura peça*Temperatura ambiente	-	33,10	Temperatura peça*Corrente de ar	+	0,562	Temperatura ambiente*Humidade	-	30,34	Temperatura ambiente*Corrente de ar	+	1,351	Temperatura peça*Temperatura ambiente*Corrente de ar
-----	---	-----	---	------	------------------	---	------	----------------------	---	-------	----------	---	-----	----------------	---	-------	---------------------------------------	---	-------	---------------------------------	---	-------	-------------------------------	---	-------	-------------------------------------	---	-------	--

Figura Q16 – Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, apresentados, figura Q17, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. No que diz respeito à normalidade, não é possível afirmar que os resíduos se ajustam à normalidade, contudo isso poderá dever-se à amostra ser de apenas 16 pontos. Através do Histograma, poder-se-á afirmar que há existência de 2 grandes grupos de dados. No gráfico “Versus Fits”, verificou-se que os resíduos não apresentam um padrão concreto, espalhando-se ao longo da gama de valores. Deste modo, não há evidência de existência de variância não constante, de falta de termos e de valores extremos (“outliers”). No gráfico “Versus Order”, verificou-se que os resíduos não seguem nenhuma tendência, espalhando-se em torno da linha central. Podemos afirmar que os resíduos são independentes.

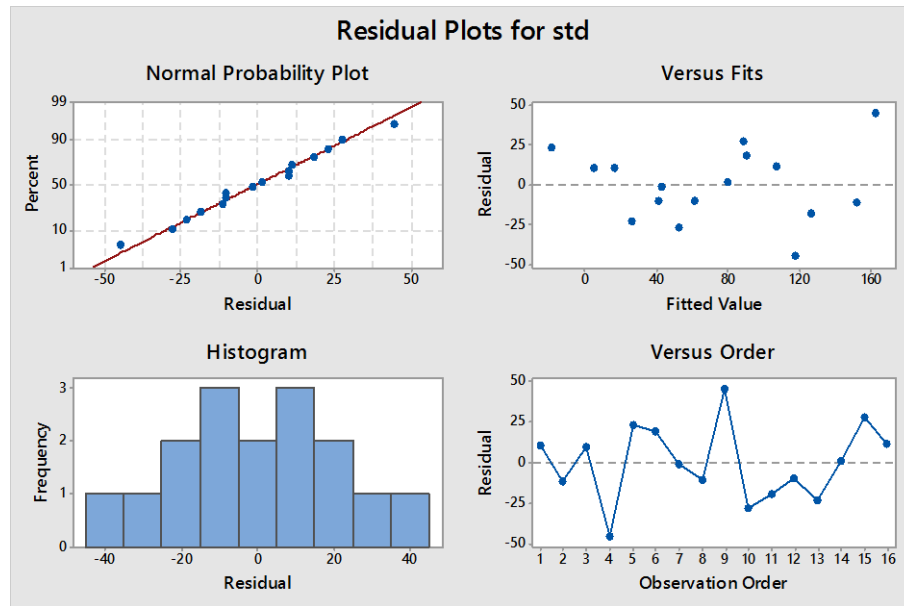


Figura Q17 – Gráficos respeitantes aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo, no valor médio medido. Através da figura Q18, verificou-se que à medida que a temperatura da peça aumenta, o desvio padrão dos valores medidos diminui. O mesmo comportamento acontece com a temperatura ambiente. Quanto à humidade, as diferenças não são significativas entre os níveis definidos, mas verificou-se que com uma humidade de 60% o desvio padrão dos valores medidos é ligeiramente menor. Por último, a presença de corrente de ar diminui o desvio padrão dos valores medidos.

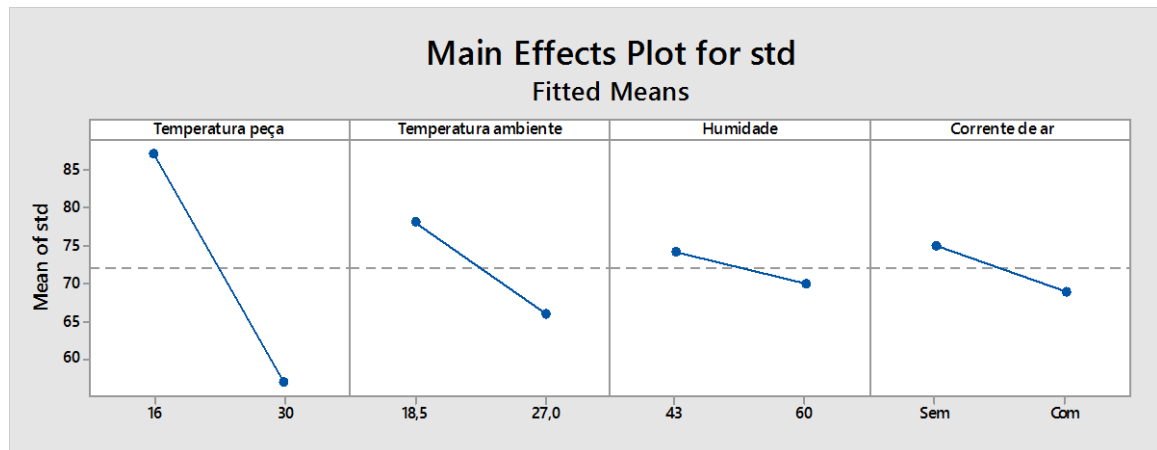


Figura Q18 – Efeito dos termos individuais presentes no modelo no desvio padrão dos valores medidos

Quanto às interações duplas presentes no modelo, na figura Q19 estão representadas as configurações de cada interação dupla que levam a um menor valor médio medido.

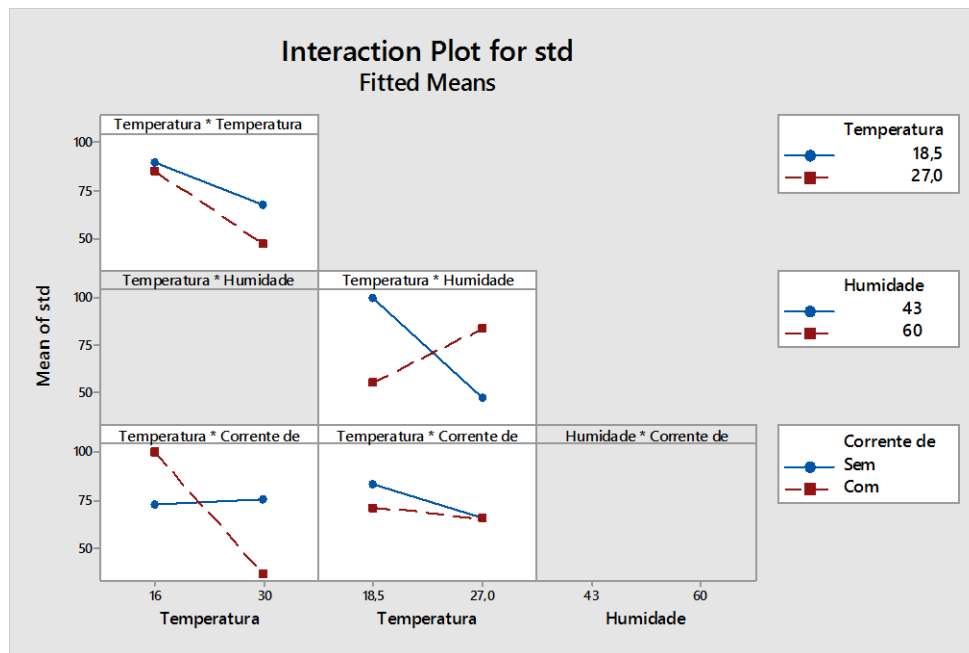


Figura Q19 - Efeito das interações duplas presentes no modelo no desvio padrão dos valores medidos

ANEXO R: Desenho de Experiências relativo a fatores pertencentes à categoria método

Estudo relativo à média dos valores medidos

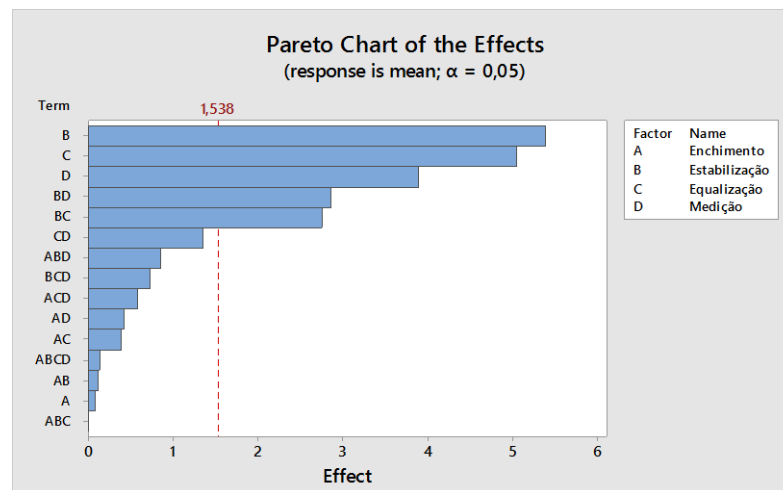


Figura R1 – Gráfico Pareto

Na figura R1, observou-se que a interação tripla entre as fases de enchimento, estabilização e equalização é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há uma interação quádrupla a retirar do modelo. Retirou-se a interação quádrupla entre as fases de enchimento, estabilização, equalização e medição do modelo.

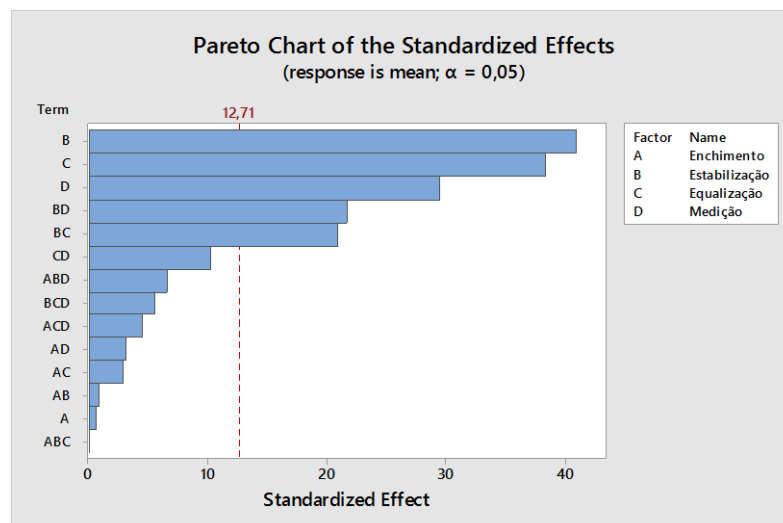


Figura R2 – Gráfico Pareto

Na figura R2, constatou-se que a interação tripla entre as fases de enchimento, estabilização e equalização é o termo que tem menor efeito na média dos valores medidos, contudo há uma interação quádrupla a retirar do modelo. Retirou-se este termo do modelo.

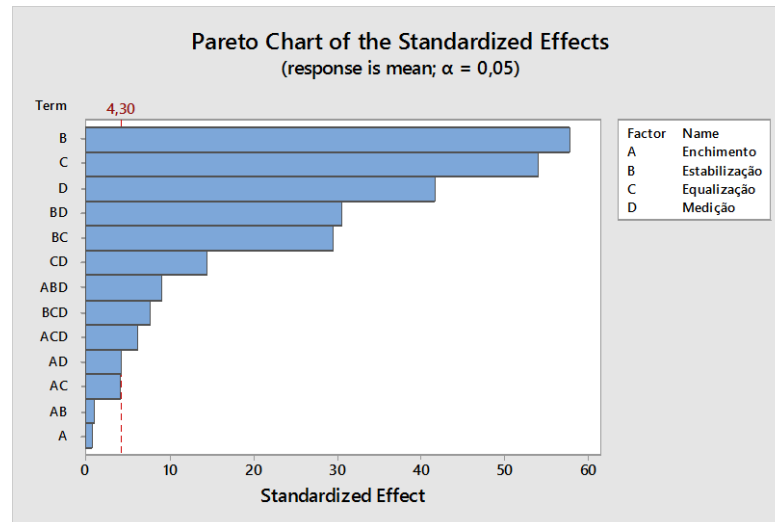


Figura R3 – Gráfico Pareto

Na figura R3, observou-se que os únicos termos que poderiam ser retirados do modelo seriam a fase de enchimento, a interação dupla entre a fase de enchimento e estabilização e a interação dupla entre a fase de enchimento e equalização. Contudo, estes termos não podem ser eliminados visto que há interações triplas com efeitos significativos na média dos valores medidos. Atingiu-se o modelo final.

Factorial Regression: mean versus Enchimento; Estabilização; Equalização; Medição

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	358,397	27,569	789,75	0,001
Linear	4	280,075	70,019	2005,78	0,000
Enchimento	1	0,022	0,022	0,64	0,509
Estabilização	1	116,878	116,878	3348,12	0,000
Equalização	1	102,273	102,273	2929,74	0,000
Medição	1	60,902	60,902	1744,63	0,001
2-Way Interactions	6	71,891	11,982	343,23	0,003
Enchimento*Estabilização	1	0,049	0,049	1,40	0,358
Enchimento*Equalização	1	0,594	0,594	17,03	0,054
Enchimento*Medição	1	0,679	0,679	19,45	0,048
Estabilização*Equalização	1	30,504	30,504	873,81	0,001
Estabilização*Medição	1	32,764	32,764	938,57	0,001
Equalização*Medição	1	7,301	7,301	209,14	0,005
3-Way Interactions	3	6,431	2,144	61,41	0,016
Enchimento*Estabilização*Medição	1	2,945	2,945	84,35	0,012
Enchimento*Equalização*Medição	1	1,378	1,378	39,48	0,024
Estabilização*Equalização*Medição	1	2,108	2,108	60,40	0,016
Error	2	0,070	0,035		
Total	15	358,467			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,186838	99,98%	99,85%	98,75%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		8,9528	0,0467	191,67	0,000	
Enchimento	-0,0745	-0,0373	0,0467	-0,80	0,509	1,00
Estabilização	-5,4055	-2,7028	0,0467	-57,86	0,000	1,00
Equalização	-5,0565	-2,5282	0,0467	-54,13	0,000	1,00
Medição	-3,9020	-1,9510	0,0467	-41,77	0,001	1,00
Enchimento*Estabilização	0,1105	0,0553	0,0467	1,18	0,358	1,00
Enchimento*Equalização	0,3855	0,1927	0,0467	4,13	0,054	1,00
Enchimento*Medição	-0,4120	-0,2060	0,0467	-4,41	0,048	1,00
Estabilização*Equalização	2,7615	1,3808	0,0467	29,56	0,001	1,00
Estabilização*Medição	2,8620	1,4310	0,0467	30,64	0,001	1,00
Equalização*Medição	1,3510	0,6755	0,0467	14,46	0,005	1,00
Enchimento*Estabilização*Medição	0,8580	0,4290	0,0467	9,18	0,012	1,00
Enchimento*Equalização*Medição	-0,5870	-0,2935	0,0467	-6,28	0,024	1,00
Estabilização*Equalização*Medição	-0,7260	-0,3630	0,0467	-7,77	0,016	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

mean = 29,71 + 2,577 Enchimento - 0,719 Estabilização - 4,769 Equalização - 0,363 Medição
- 0,2353 Enchimento*Estabilização + 0,4604 Enchimento*Equalização
- 0,5731 Enchimento*Medição + 0,14002 Estabilização*Equalização -
0,0357 Estabilização*Medição + 0,3205 Equalização*Medição
+ 0,04290 Enchimento*Estabilização*Medição - 0,05336 Enchimento*Equalização*Medição
- 0,006600 Estabilização*Equalização*Medição

Figura R4 - Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, apresentados na figura R5, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. Os gráficos resultantes não permitem a análise dos resíduos. O resultado destes gráficos pode ter sido devido ao efeito de um fator não utilizado no DOE (ruído).

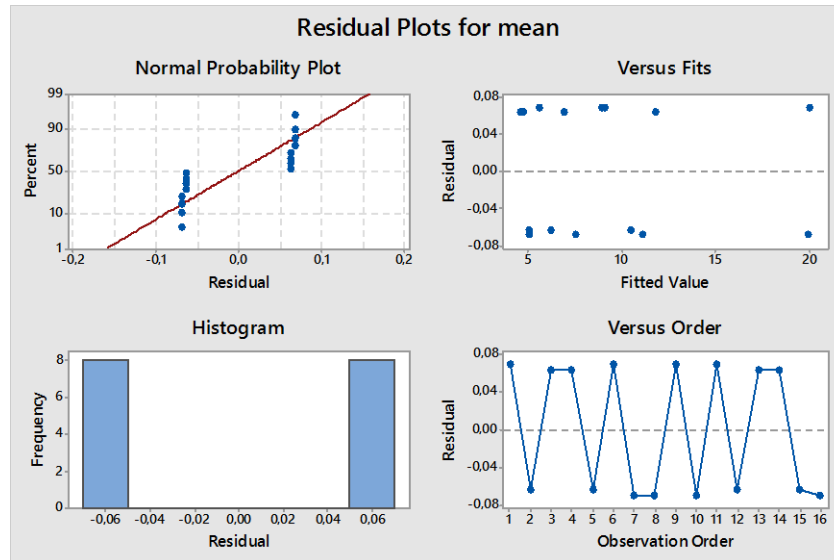


Figura R5 - Gráficos respeitantes aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo, no valor médio medido. Na figura R6 verificou-se que à medida que se aumenta o valor da parametrização nas fases de estabilização, equalização e medição, o valor médio medido é menor. Quanto à fase de enchimento, constatou-se que um aumento ou uma diminuição no valor da parametrização, não tem uma mudança significativa no valor médio medido.

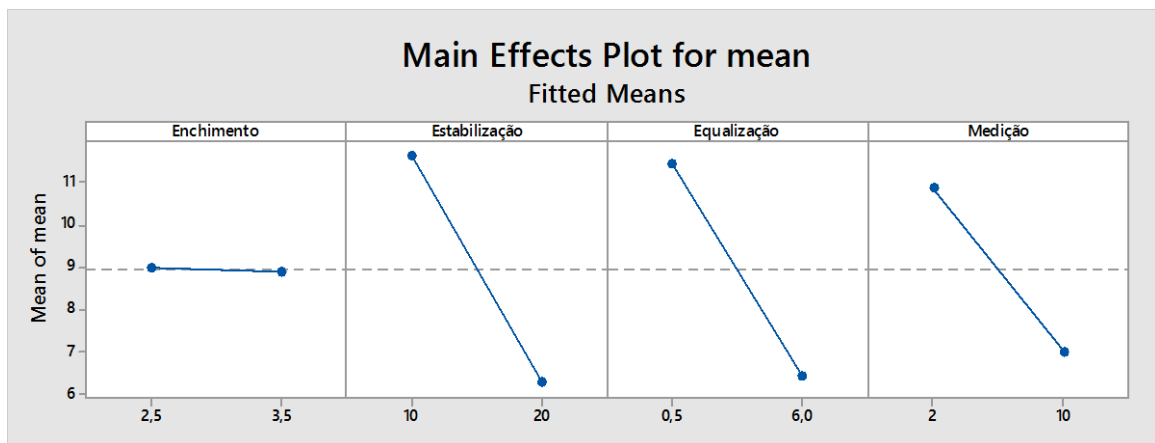


Figura R6 - Efeito dos termos individuais presentes no modelo na média dos valores medidos

Quanto às interações duplas presentes no modelo, na figura R7 estão representadas as configurações de cada interação dupla que levam a um menor valor médio medido.

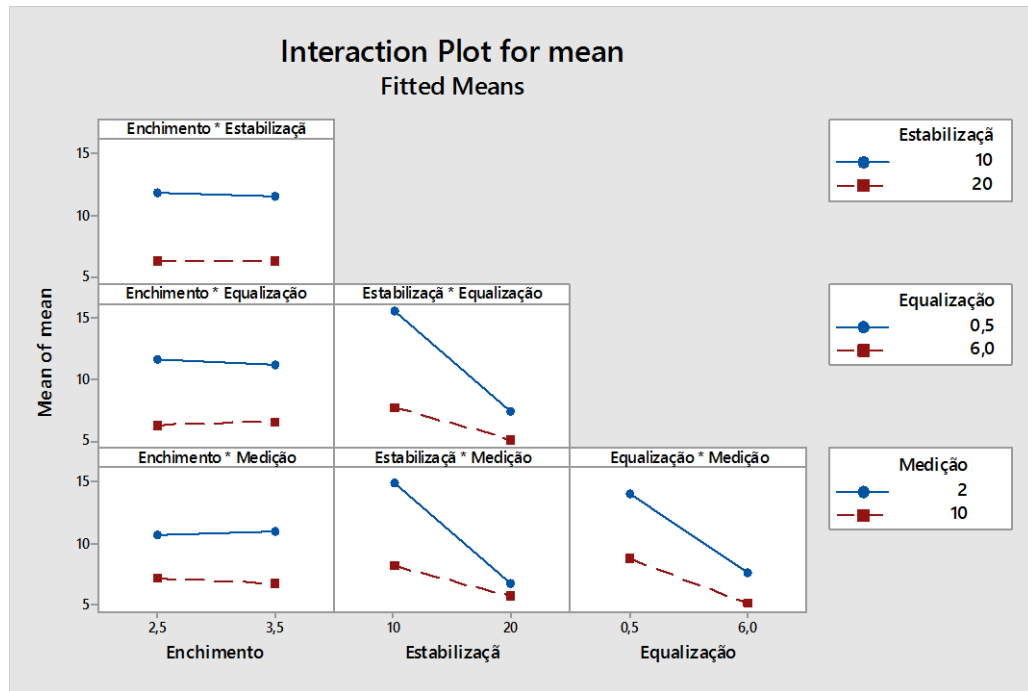


Figura R7 - Efeito das interações duplas presentes no modelo na média dos valores medidos

Estudo relativo ao desvio padrão dos valores medidos

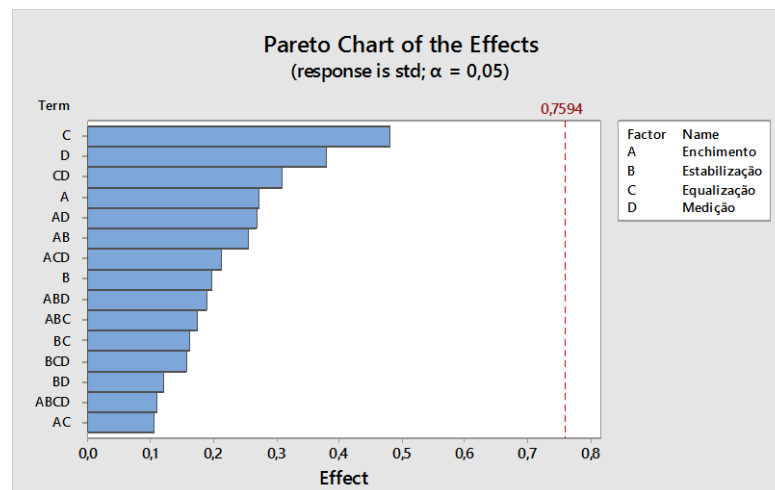


Figura R8 – Gráfico Pareto

Como podemos observar na figura R8, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos, contudo há uma interação quádrupla a retirar do modelo. Retirou-se a interação quádrupla entre as fases de enchimento, estabilização, equalização e medição do modelo.

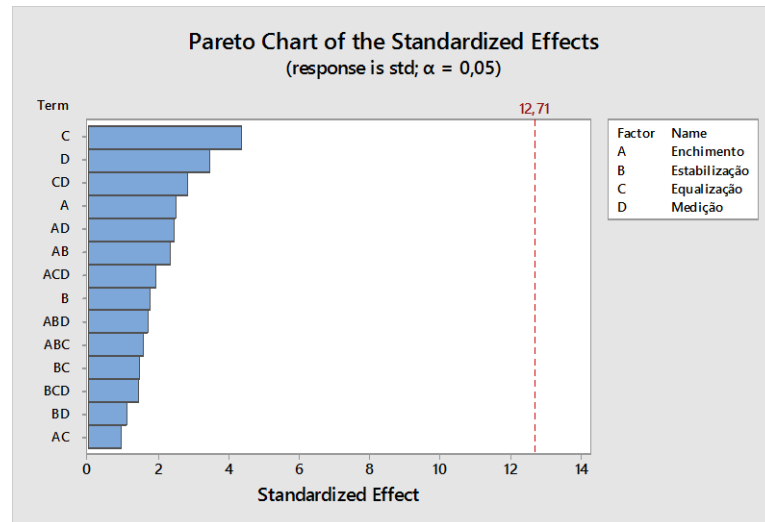


Figura R9 – Gráfico Pareto

Na figura R9, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos, contudo há ainda interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre as fases de estabilização, equalização e medição do modelo.

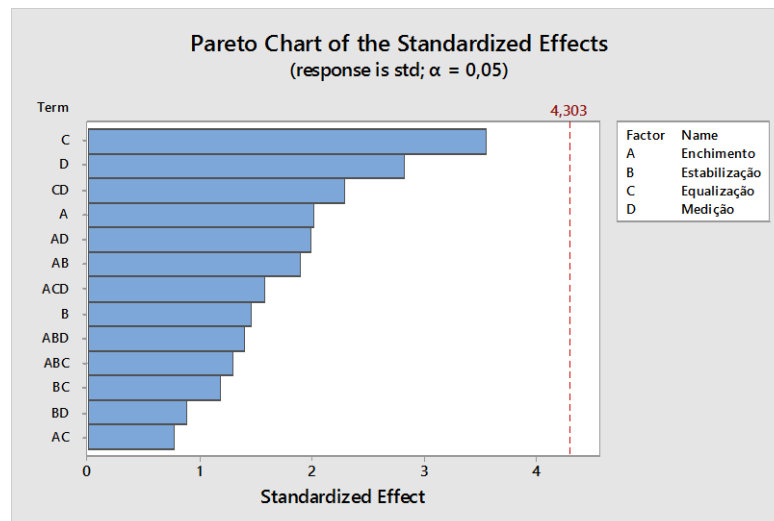


Figura R10 – Gráfico Pareto

Na figura R10, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos, contudo há ainda interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre as fases de enchimento, estabilização e equalização do modelo.

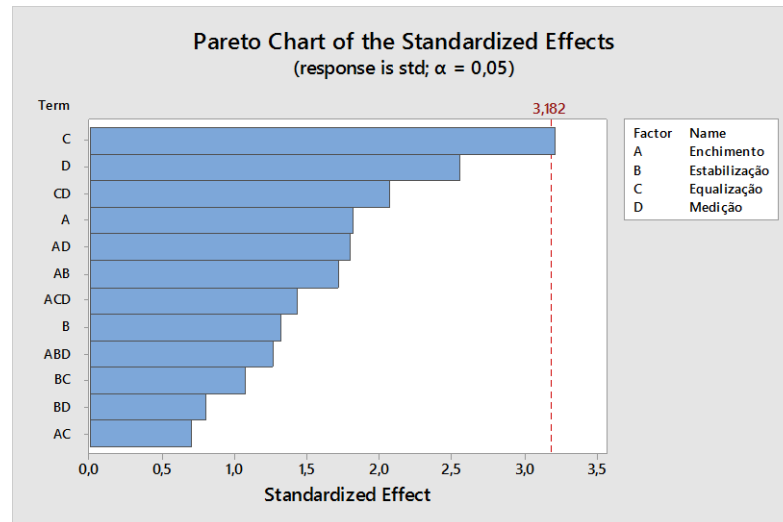


Figura R11 – Gráfico Pareto

Na figura R11, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos, contudo há ainda interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre as fases de enchimento, estabilização e medição do modelo.

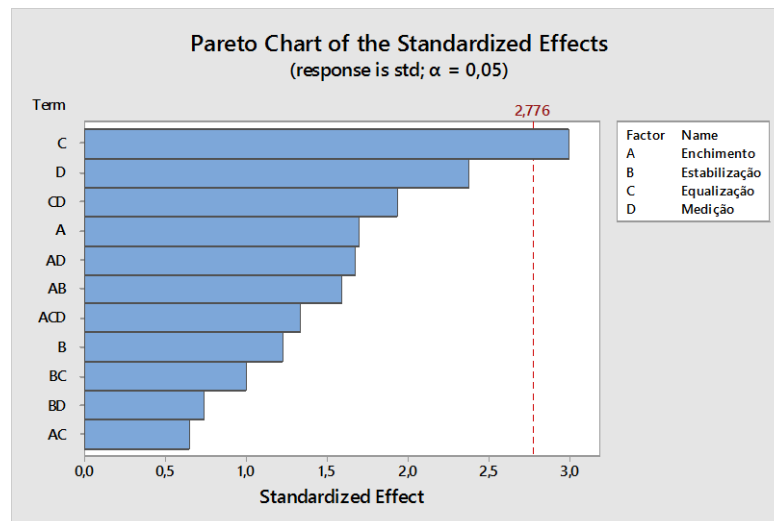


Figura R12 – Gráfico Pareto

Na figura R12, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos, contudo há ainda interações triplas a retirar do modelo. Retirou-se a interação tripla entre as fases de enchimento, equalização e medição do modelo.

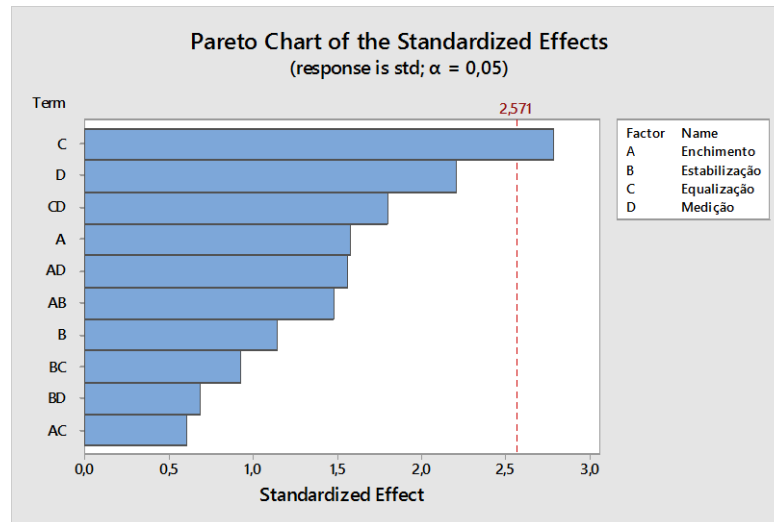


Figura R13 – Gráfico Pareto

Na figura R13, a interação dupla entre as fases de enchimento e equalização é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos. Retirou-se este termo do modelo.

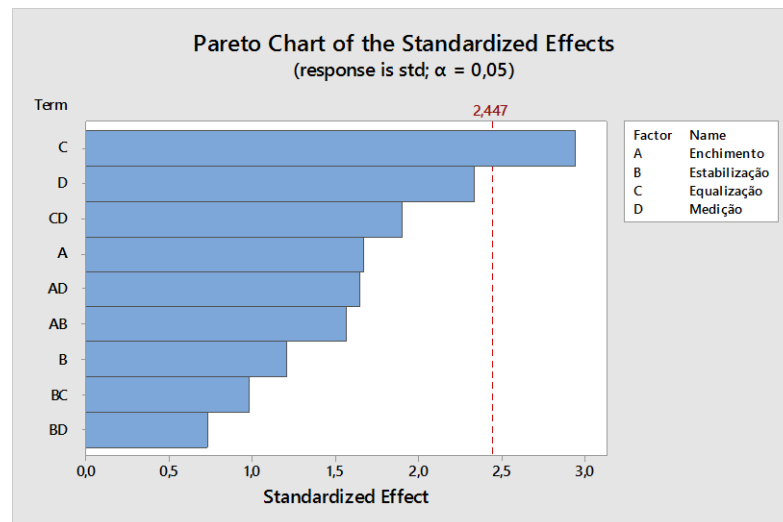


Figura R14 – Gráfico Pareto

Na figura R14, a interação dupla entre as fases de estabilização e medição é o termo que tem menor efeito no desvio padrão dos valores medidos. Retirou-se este termo do modelo.

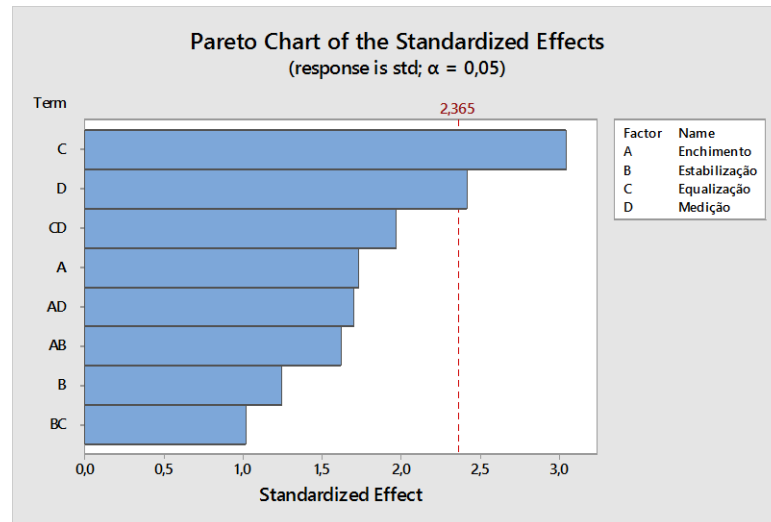


Figura R15 – Gráfico Pareto

Neste momento, se analisarmos a tabela ANOVA, o modelo explica 81,21% da variabilidade dos valores medidos. Se a interação dupla entre as fases de estabilização e equalização for retirada do modelo, este modelo passaria a ter um valor de “R-sq” inferior a 80%. Contudo, esse valor será de 78,43%. Deste modo, é favorável retirar este termo, visto que o “R-sq” não é muito prejudicado. Retirou-se este termo do modelo.

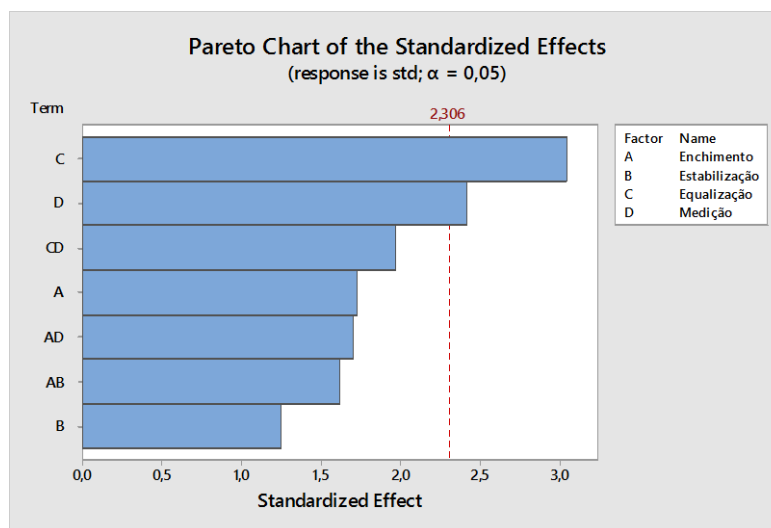


Figura R16 – Gráfico Pareto

Se a interação dupla entre a fase de enchimento e a fase de estabilização fosse retirada do modelo, este modelo passaria a ter um valor de “R-sq” de 71,33%. A queda de percentagem deste indicador, já não justificará a eliminação do termo. Atingiu-se o modelo final.

Factorial Regression: std versus Enchimento; Estabilização; Equalização; Medição

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,8973	0,41390	4,15	0,032
Linear	4	1,9592	0,48979	4,92	0,027
Enchimento	1	0,2972	0,29718	2,98	0,122
Estabilização	1	0,1552	0,15517	1,56	0,247
Equalização	1	0,9256	0,92562	9,29	0,016
Medição	1	0,5812	0,58120	5,83	0,042
2-Way Interactions	3	0,9381	0,31270	3,14	0,087
Enchimento*Estabilização	1	0,2622	0,26216	2,63	0,143
Enchimento*Medição	1	0,2906	0,29056	2,92	0,126
Equalização*Medição	1	0,3854	0,38538	3,87	0,085
Error	8	0,7970	0,09963		
Total	15	3,6943			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,315635	78,43%	59,55%	13,70%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,8252	0,0789	10,46	0,000	
Enchimento	-0,2726	-0,1363	0,0789	-1,73	0,122	1,00
Estabilização	-0,1970	-0,0985	0,0789	-1,25	0,247	1,00
Equalização	-0,4810	-0,2405	0,0789	-3,05	0,016	1,00
Medição	-0,3812	-0,1906	0,0789	-2,42	0,042	1,00
Enchimento*Estabilização	0,2560	0,1280	0,0789	1,62	0,143	1,00
Enchimento*Medição	0,2695	0,1348	0,0789	1,71	0,126	1,00
Equalização*Medição	0,3104	0,1552	0,0789	1,97	0,085	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

std = 6,30 - 1,445 Enchimento - 0,1733 Estabilização - 0,1721 Equalização - 0,296 Medição
+ 0,0512 Enchimento*Estabilização + 0,0674 Enchimento*Medição

Figura R17 – Tabela ANOVA

Após a obtenção do modelo final, é necessário analisar os gráficos respeitantes aos resíduos, figura R18, para garantir que o modelo é o adequado às medições efetuadas. Tanto no gráfico “Normal Probability Plot” como no Histograma, verificou-se que os resíduos se ajustam à normalidade. No gráfico “Versus Fits”, verificou-se que os resíduos não apresentam um padrão concreto, espalhando-se ao longo da gama de valores. Deste modo, não há evidência de existência de variância não constante, de falta de termos e de valores extremos (“outliers”). No gráfico “Versus Order”, verificou-se que os resíduos não seguem nenhuma tendência, espalhando-se em torno da linha central. Podemos afirmar que os resíduos são independentes.

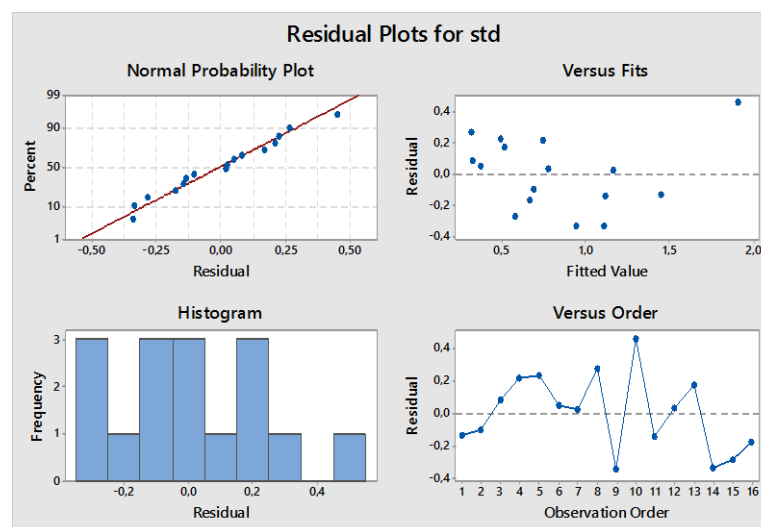


Figura R18 – Gráficos respeitantes aos resíduos

Posteriormente, deve-se avaliar o efeito dos termos, presentes no modelo, no desvio padrão dos valores medidos. Através da figura R19, verificou-se que à medida que se aumenta o valor da parametrização nas fases de enchimento, estabilização, equalização e medição, a variabilidade no valor medido é inferior.

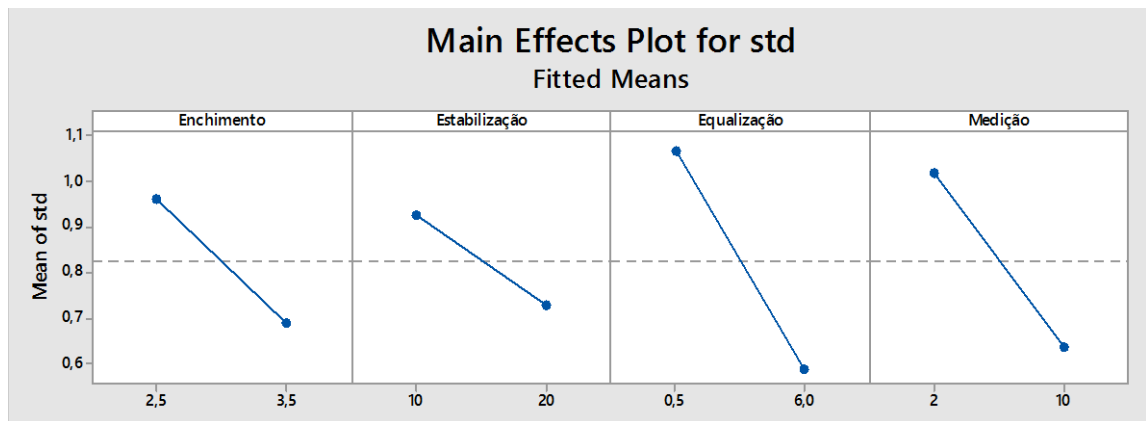


Figura R19 – Efeito dos termos individuais presentes no modelo no desvio padrão dos valores medidos

Quanto às interações duplas presentes no modelo, na figura R20 estão representadas as configurações de cada interação dupla que levam a uma menor variabilidade no valor medido.

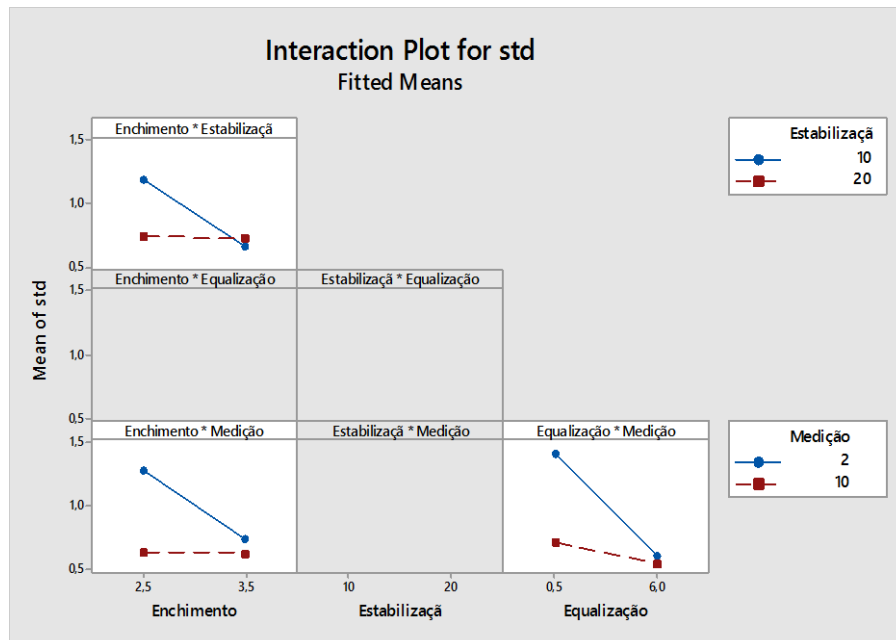
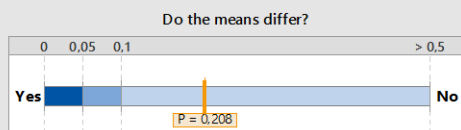


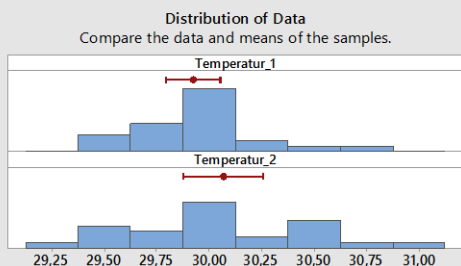
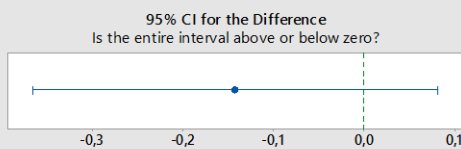
Figura R20 - Efeito das interações duplas presentes no modelo no desvio padrão dos valores medido

ANEXO S: Figuras resultantes do Teste de Hipóteses realizado à média das medições realizadas com peça de referência fora ou dentro da câmara de ensaio

2-Sample t Test for the Mean of Temperatur_1 and Temperatur_2 Summary Report



The mean of Temperatur_1 is not significantly different from the mean of Temperatur_2 ($p > 0.05$).



Individual Samples		
Statistics	Temperatur_1	Temperatur_2
Sample size	23	25
Mean	29,926	30,068
95% CI	(29,80; 30,05)	(29,877; 30,259)
Standard deviation	0,29575	0,46163

Difference Between Samples	
Statistics	*Difference
Difference	-0,14191
95% CI	(-0,36614; 0,082311)

*Difference = Temperatur_1 - Temperatur_2

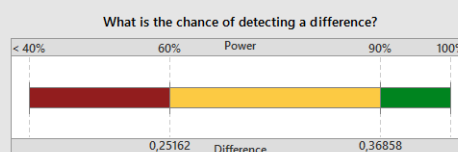
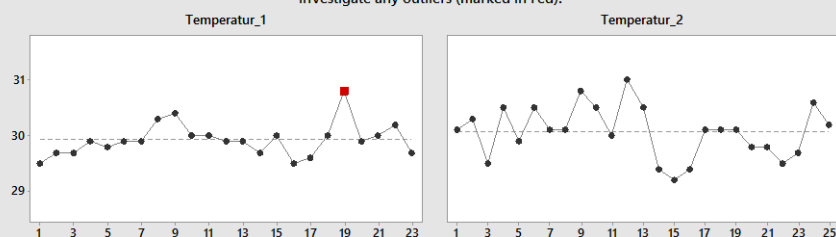
Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0,36614 and 0,082311.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

Figura S1 - Relatório do teste de hipóteses realizado

2-Sample t Test for the Mean of Temperatur_1 and Temperatur_2 Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0.05$ and sample sizes = 23; 25:
If the true means differed by 0,25162, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 0,36858, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 23 and 25?	
Difference	Power
0,25162	60%
0,28245	70%
0,31853	80%
0,36858	90%

Observed difference = -0,14191

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Figura S2 – Relatório do teste de hipóteses realizado

Anexo T: Figuras resultantes da regressão realizada entre a temperatura ambiente e a percentagem de retrabalho em cada turno

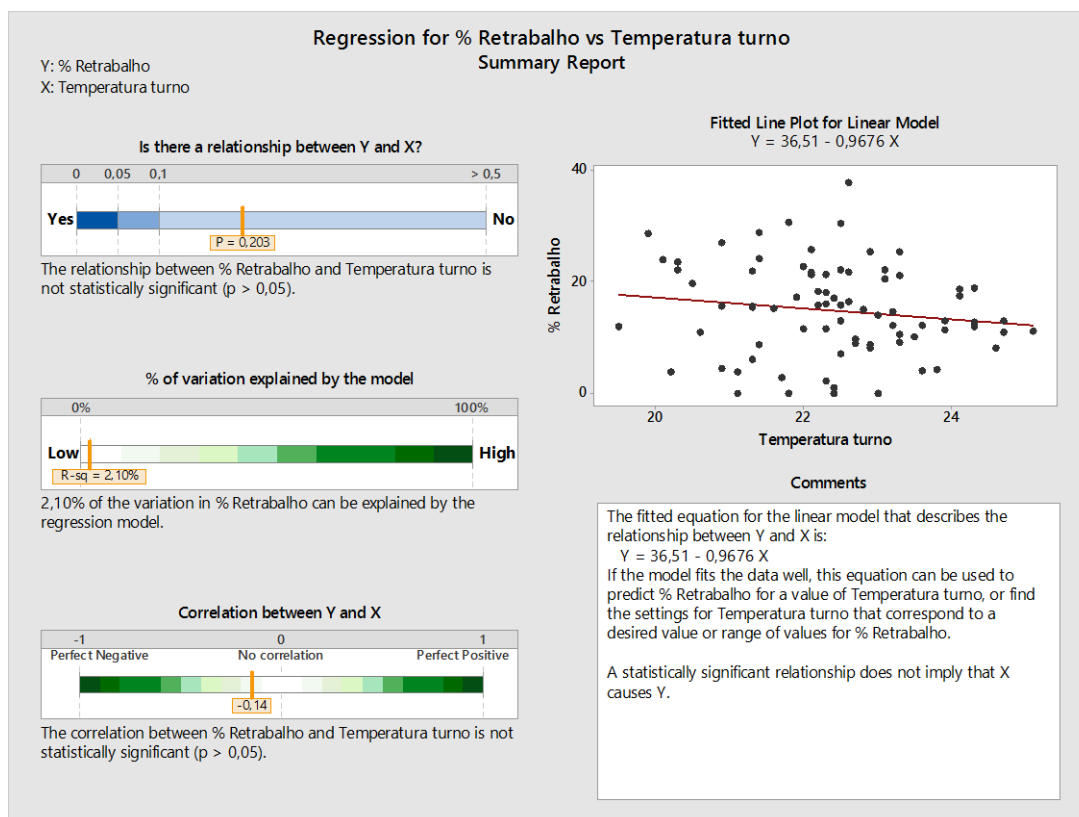
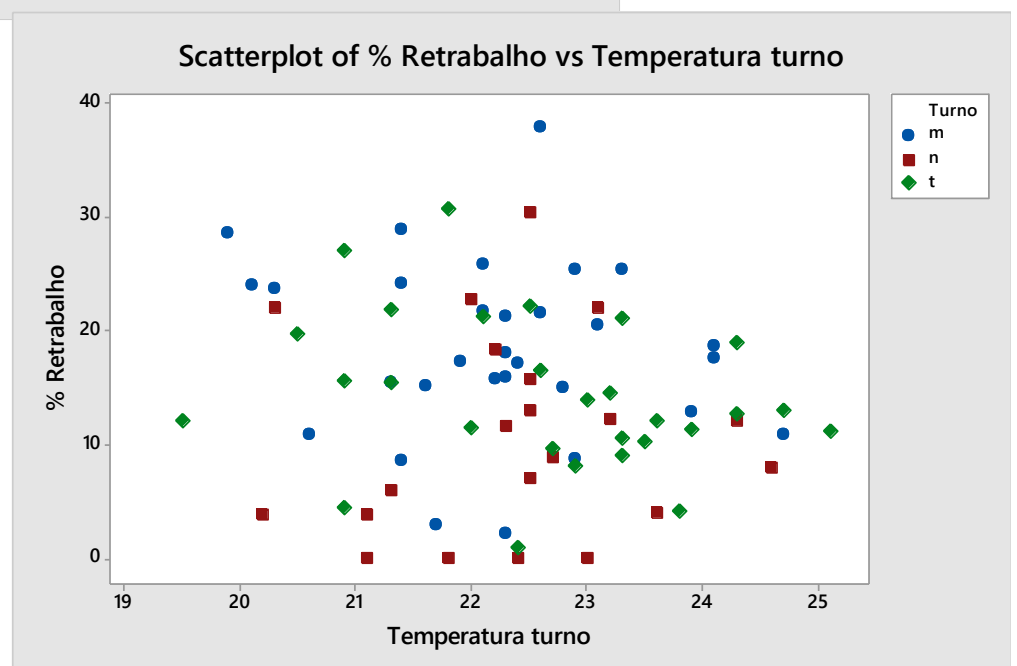


Figura T1 – Relatório da regressão realizada

Figura T2 – “Scatterplot” entre % Retrabalho e temperatura ambiente no turno



ANEXO U: Dados de apoio ao subcapítulo 4.3.9

Tabela U1 – Previsão das quantidades a produzir nos meses de maio, junho, julho e agosto

Referência	maio	junho	julho	agosto
1	225	2100	1575	3975
2	0	7900	1975	0
3	5466	12716	5862	13206
4	5208	12800	5910	13356
5	5400	12600	5850	13275
6	2160	3600	1620	4860
7	3000	6780	11760	6840
8	2340	6480	3060	6840
Estudada	5798	10812	17476	11254
10	720	816	240	1200
11	0	0	0	0
12	60	0	60	180
13	0	0	0	480
14	0	0	90	90
15	0	0	240	0
16	0	0	120	150
17	25	0	41	120
18	0	0	30	120
Total	30402	76604	55909	75946

ANEXO V: Fotografias relativas à porta do armazém e das ventoinhas na linha de produção



Figura V1 – Ventoinha na linha de produção



Figura V2 - Ventoinha na linha de produção



Figura V3 – Porta do armazém com sinalização de altura

ANEXO W: Definição dos limites da temperatura ambiente a usar no “shop floor”

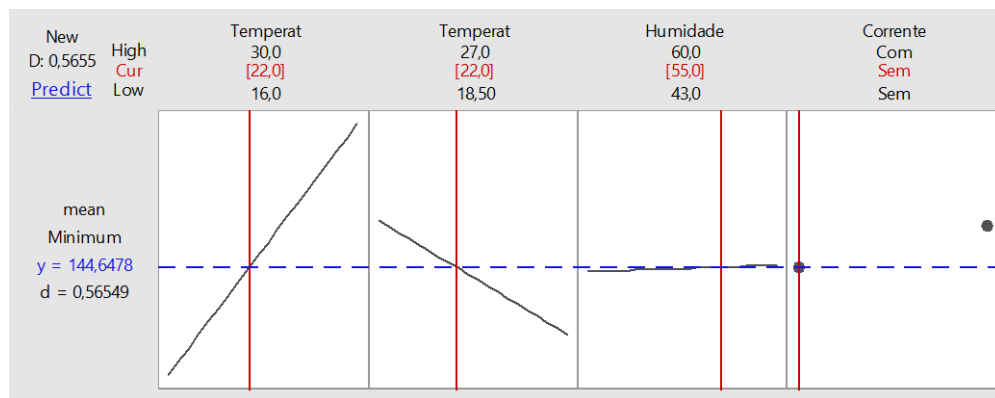


Figura W1 - Influência da temperatura do “shop floor” e da peça a a 22°C no valor médio e na variabilidade das medições

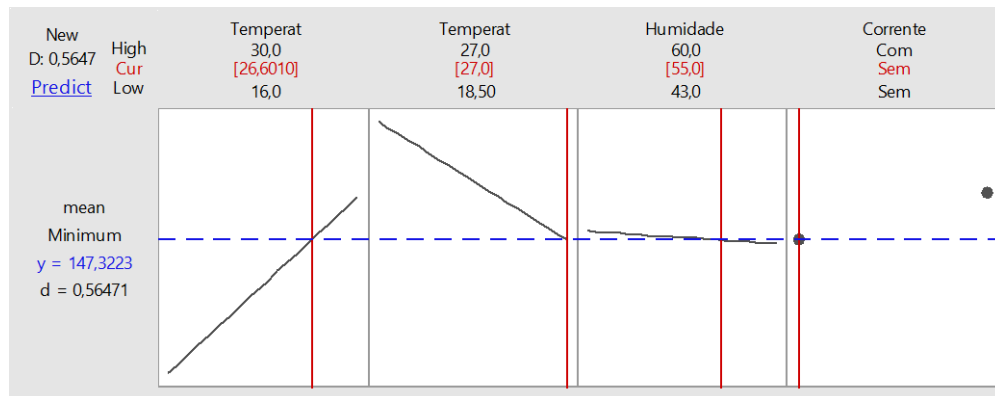


Figura W2 - Influência da temperatura do “shop floor” e da peça a a 27°C no valor médio e na variabilidade das medições

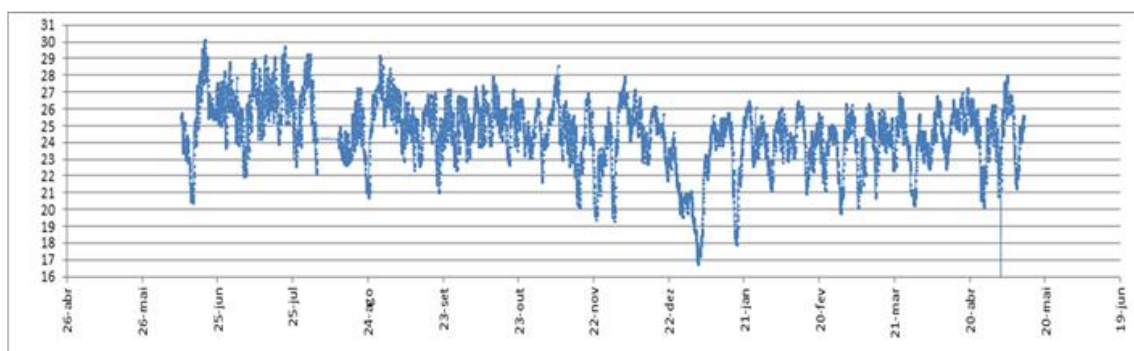


Figura W3 – Registo das temperaturas no “shop floor”

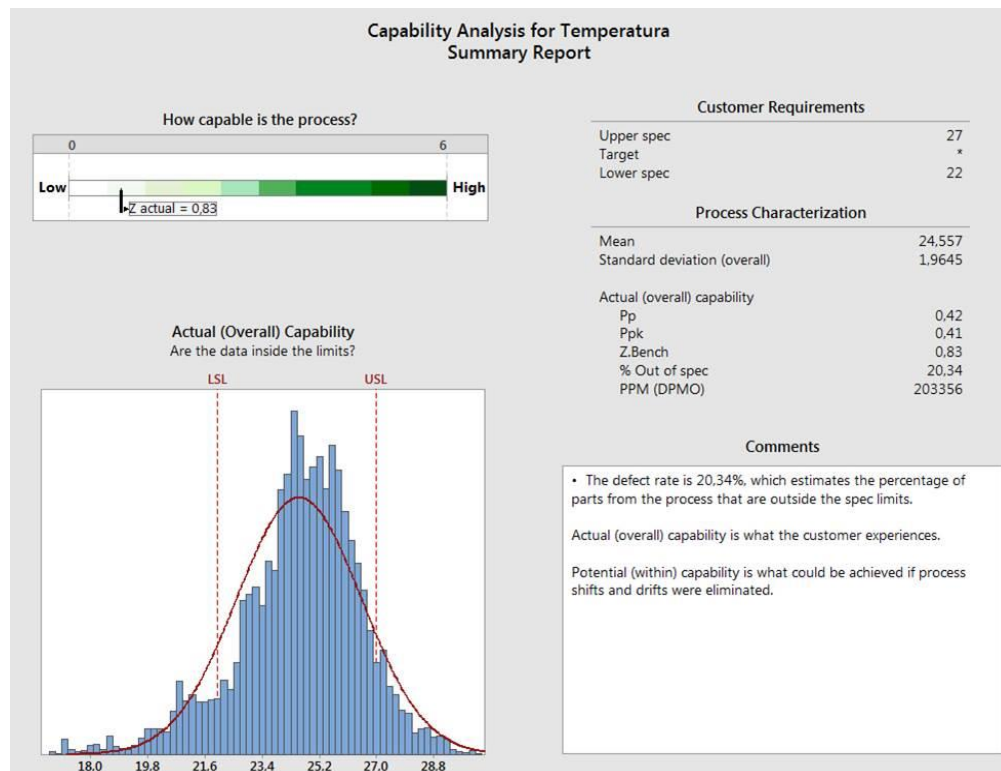


Figura W4- Análise estatística do registo das temperaturas no “shop floor”

ANEXO X: Etiqueta criada para controlo de tempo de arrefecimento das peças

BorgWarner

Brazing

Data: dd/mm Referência: _____

Hora saída forno: hh:mm

↓ +40 minutos

Hora ok para produzir: hh:mm

Figura X1 – Etiqueta criada para controlo de tempo de arrefecimento da peça



Figura X2 – Carro com etiqueta criada

ANEXO Y: Influência das parametrizações das fases do ensaio no valor médio e na variabilidade das medições

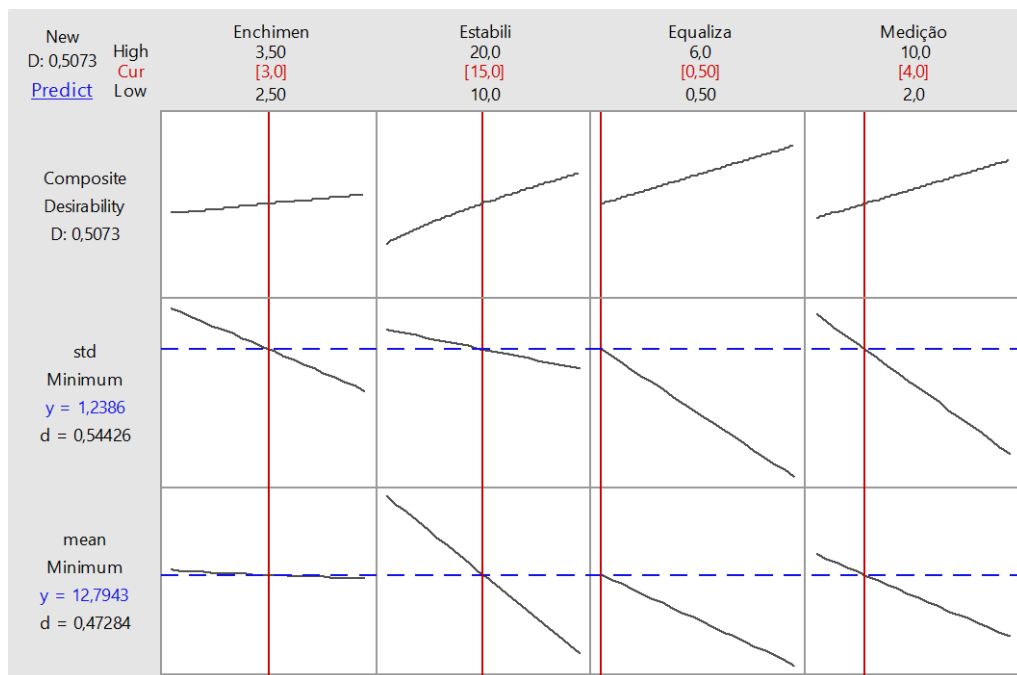


Figura Y1 – Influência da parametrização sem melhorias no valor médio e na variabilidade das medições

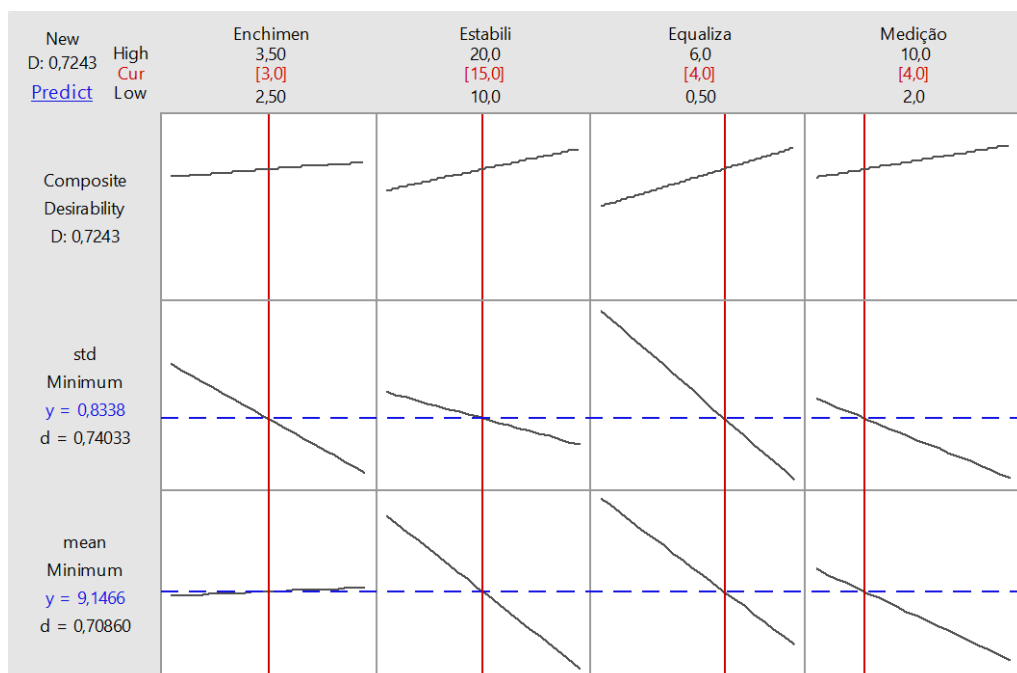


Figura Y2 – Influência da parametrização com melhorias no valor médio e na variabilidade das medições

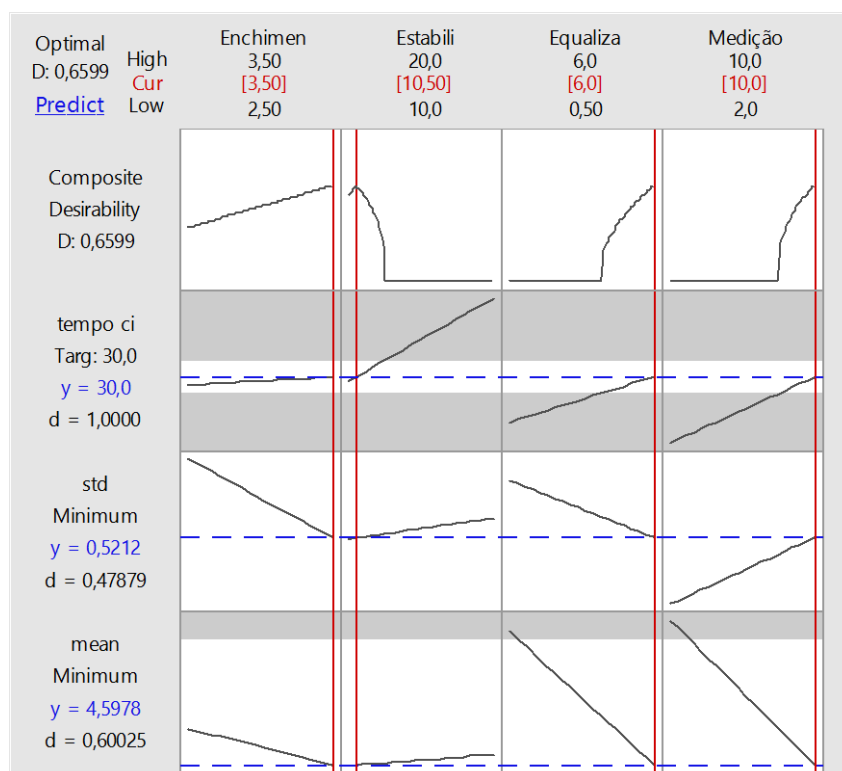


Figura Y3 - Influência da parametrização com melhorias no valor médio e na variabilidade das medições

ANEXO Z: Placard relativo à inspeção da porta automática

Inspeção <u>MEUSAL INTERNA</u>			
Equipamento N.º		Doc. Referência N.º	Ano
AD 009			2016
MÊS	DATA	N.º MECAN.	RUBRICA
Janeiro	26	CW000390	R=
Fevereiro	24	CW000390	R=
Março	22	CW000390	R=
Abril	18	CW000390	R=
Maio	25	32983	R=
Junho	14	32983	R=
Julho			
Agosto			
Setembro			
Outubro			
Novembro			
Dezembro			

Figura Z1 – Placard relativo à inspeção da porta automática